



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141585

ANALISIS PENGARUH VARIASI *AIRGAP* DAN JARAK EKSENTRIK POROS INPUT TERHADAP TORSI *CYCLOID MAGNETIC GEAR*

FAIZ JOHAN RAZAQ
NRP 02111440000147

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TM141585

**ANALISIS PENGARUH VARIASI *AIRGAP* DAN
JARAK EKSENTRIK POROS INPUT TERHADAP
TORSI *CYCLOID MAGNETIC GEAR***

FAIZ JOHAN RAZAQ
NRP 02111440000147

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TM141585

***INFLUENCE ANALYSIS OF AIRGAP AND
ECCENTRIC DISTANCE OF INPUT SHAFT
VARIATION TO THE TORQUE OF CYCLOID
MAGNETIC GEAR***

FAIZ JOHAN RAZAQ
NRP 02111440000147

Supervisor
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

*Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Institute of Technology Sepuluh Nopember
Surabaya 2018*

**ANALISIS PENGARUH VARIASI AIRGAP DAN
JARAK EKSENTRIK POROS INPUT TERHADAP
TORSI CYCLOID MAGNETIC GEAR**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

FAIZ JOHAN RAZAO

NRP. 02111440000147

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA (Pembimbing)
NIP. 196508101991021001
2. Achmad Syaifudin, ST, M.Eng, PhD. (Penguji I)
NIP. 197909262005011001
3. Ir. Julendra B. Ariatedja, MT (Penguji II)
NIP. 196807061999031004
4. Ari Kurniawan Saputra, ST, MT (Penguji III)
NIP. 198604012015041001

SURABAYA

JULI, 2018

ANALISIS PENGARUH VARIASI *AIRGAP* DAN JARAK EKSENTRIK POROS INPUT TERHADAP TORSI *CYCLOID MAGNETIC GEAR*

Nama Mahasiswa : Faiz Johan Razaq
NRP : 02111440000147
Departemen : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

ABSTRAK

Magnetic gear mampu bekerja sebagai transmisi daya tanpa adanya kontak antar gigi. Sehingga *magnetic gear* bisa menjadi solusi untuk *mechanical gear* karena *mechanical gear* sering mengalami kegagalan akibat tegangan kontak dan tegangan bending yang bekerja pada gigi-gigi yang bersinggungan. Dalam pembuatan *magnetic gear*, *airgap* dan jarak eksentrik poros input sangat berpengaruh terhadap torsi.

Penelitian ini menganalisis variasi *airgap* dan jarak eksentrik poros input pada *cycloid magnetic gear* dengan rasio gear yaitu -1:30 dan menggunakan *software* Ansys Maxwell 3D. Simulasi *transient* dilakukan pada masing-masing variasi untuk mendapatkan sudut putaran *inner gear* yang menghasilkan torsi maksimal. Selanjutnya dilakukan simulasi *magnetostatic* untuk mendapatkan torsi maksimal yang lebih akurat, kontur induksi magnetik (B), dan grafik resultan induksi magnetik (B_{total}), induksi magnetik pada arah sumbu-X (B_x), induksi magnetik pada arah sumbu-Y (B_y), dan induksi magnetik pada arah sumbu-Z (B_z) di daerah *airgap*.

Hasil dari penelitian ini yaitu bertambahnya *airgap* mengakibatkan penurunan torsi *cycloid magnetic gear*. Penurunan torsi terjadi karena induksi magnetik di daerah *airgap* semakin berkurang dengan bertambahnya *airgap*. Peningkatan *airgap* dari 0,2 mm ke 1 mm, 1 mm ke 2 mm, dan 2 mm ke 3 mm mampu menurunkan torsi dalam kisaran 20,193% - 26,709% (13,84 N.m - 27,65 N.m). Bertambahnya jarak eksentrik poros input

mengakibatkan penurunan torsi *cycloid magnetic gear*. Semakin besar jarak eksentrik poros input membuat jarak antara *inner gear* dan *outer gear* menjadi semakin bertambah, sehingga induksi magnetik di daerah *airgap* menjadi semakin berkurang dan torsi yang dihasilkan menjadi turun. Namun torsi untuk jarak eksentrik poros input 1 mm dan 2 mm memiliki nilai lebih rendah daripada jarak eksentrik poros input 3 mm karena karena terjadi pelemahan induksi magnetik di posisi *airgap* 270° sehingga torsi menjadi rendah. Peningkatan jarak eksentrik poros input dari 1 mm ke 2 mm, 2 mm ke 3 mm, 3 mm ke 4 mm, dan 4 mm ke 5 mm mampu mengubah torsi dalam kisaran 0,945% - 45,420% (0,775 N.m - 36,478 N.m). *Cycloid magnetic gear* yang memiliki densitas torsi tinggi yaitu memiliki *airgap* dan jarak eksentrik poros input yang kecil pada desain. Dalam penelitian ini, densitas torsi paling tinggi yang diperoleh yaitu 125,923 kN.m/m³ dengan menggunakan *airgap* 0,2 mm dan jarak eksentrik poros input 3 mm.

Kata kunci : *airgap*, *cycloid magnetic gear*, jarak eksentrik, magnet permanen, torsi

INFLUENCE ANALYSIS OF AIRGAP AND ECCENTRIC DISTANCE OF INPUT SHAFT VARIATION TO THE TORQUE OF CYCLOID MAGNETIC GEAR

Student's Name : Faiz Johan Razaq
NRP : 02111440000147
Department : *Mechanical Engineering FTI-ITS*
Supervisor : *Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA*

ABSTRACT

Magnetic gear able to work as a power transmission without any contact between the teeth. Magnetic gear can be a solution for mechanical gear because mechanical gear often failed due to contact stress and bending stress acting on the teeth that intersect. In the manufacture of magnetic gears, airgap and eccentric distance of input shaft greatly affect the torque.

This study analyzed the variation of airgap and eccentric distance of input shaft on cycloid magnetic gear with the gear ratio is -1:30 and using software Ansys Maxwell 3D. Transient simulations are performed on each variation to obtain inner gear rotation angle that produces maximum torque. Then magnetostatic simulation performed to obtain more accurate maximum torque, magnetic induction (B) contour, and graph of magnetic induction magnitude ($B_{\text{magnitude}}$), magnetic induction on X-axis direction (B_x), magnetic induction on Y-axis direction (B_y), and magnetic induction on Z-axis direction (B_z) in airgap region.

The result of this research is the increase of airgap resulting the decrease of torque of cycloid magnetic gear. The decrease of torque happened because magnetic induction in airgap region decrease by the increase of airgap. The increase of airgap from 0,2 mm to 1 mm, 1 mm to 2 mm, and 2 mm to 3 mm can decrease the torque in the range of 20,193% - 26,709% (13,84 N.m - 27,65 N.m). The increase of eccentric distance of input shaft resulting the decrease of torque of cycloid magnetic gear. The greater of

eccentric distance of input shaft makes the distance between inner gear and outer gear becomes more stretched so the magnetic induction in airgap region decrease and the torque decrease. But the torque for eccentric distance of the input shaft 1 mm and 2 mm has lower value than eccentric distance of the input shaft 3 mm because magnetic induction weakening in the position of airgap 270° so that the torque becomes low. The increase of eccentric distance of input shaft from 1 mm to 2 mm, 2 mm to 3 mm, 3 mm to 4 mm, and 4 mm to 5 mm can change the torque in the range of 0,945% - 45,420% (0,775 N.m - 36,478 N.m). Cycloid magnetic gear that has high torque density has small airgap and eccentric distance of input shaft in the design. In this research, the highest torque density is 125,923 kN.m/m³ by using airgap 0,2 mm and eccentric distance of input shaft 3 mm.

Key words : *airgap, cycloid magnetic gear, eccentric distance, permanent magnet, torque*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, yang atas rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penyusunan Tugas Akhir yang berjudul **“Analisis Pengaruh Variasi *Airgap* dan Jarak Eksentrik Poros Input terhadap Torsi *Cycloid Magnetic Gear*”**.

Selama penulisan laporan Tugas Akhir ini tentunya penulis tidak lepas dari bantuan dan sokongan dari banyak pihak. Oleh karena itu, dengan penuh kerendahan hati penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang membantu dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini, khususnya kepada :

1. Kedua orang tua saya, Ayahanda H. Moh. Hamzah, S.Ag, M.PdI dan Ibunda Hj. Siti Mukhayyaroh yang senantiasa memberi dukungan dan doa tiada henti hingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan lancar. Serta mbak Hj. Arina Listya Hariani, S.AP dan mas H. Iqbal Farid, S.T yang membuat penulis terus termotivasi dan semangat.
2. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA selaku dosen pembimbing yang selalu sabar dalam memberi bimbingan, saran, semangat, dan waktu yang diberikan kepada penulis hingga Tugas Akhir ini selesai.
3. Bapak Ir. Julendra Bambang Ariatedja, M.T, Bapak Achmad Syaifudin, S.T, M.Eng, Ph.D, dan Bapak Ari Kurniawan Saputra, S.T, M.T selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran demi sempurnanya Tugas Akhir ini.
4. Bapak Moch. Solichin, S.T, M.T selaku dosen wali yang selalu memberikan masukan dan bimbingannya selama penulis berada di bangku kuliah.
5. Rekan satu tim Tugas Akhir, Gustri Erwin Rasyidwanto, Rahmat Ikhrahmadani, Alfiana Nur Hidayati, Hafiz Yogastyawan, dan Akbar Robbi Cahyana yang selalu saling

memberikan masukan di setiap kesulitan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.

6. Mas Dian Adi Nugraha yang telah bersedia meminjamkan komputer, fasilitas, dan ruangan Laboratorium Komputasi dan CAE sehingga penulis mampu melakukan pengambilan data Tugas Akhir.
7. Teman-teman Laskar Perpan yang selalu menemani dan menyertai dalam susah dan senang selama penulis berada di bangku kuliah.
8. Keluarga besar Teknik Mesin 2014 (M57) yang kebersamaan penulis sepanjang masa perkuliahan.
9. Pengurus Ash-Shaff 2015-2016, BEM FTI 2015-2016, dan DIMENSI 2016-2017 yang telah memberikan kebersamaan yang indah selama ini.
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu hingga pelaksanaan Tugas Akhir ini dapat terselesaikan dengan baik.

Dalam penulisan laporan ini penulis merasa masih banyak kekurangan-kekurangan baik pada teknis penulisan maupun materi, mengingat akan kemampuan terbatas yang dimiliki penulis. Untuk itu kritik dan saran dari semua pihak sangat penulis harapkan demi penyempurnaan pembuatan laporan ini.

Akhir kata, penulis berharap semoga Tugas AKhir ini dapat memberikan manfaat dan sumbangsih bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Serta semoga Allah memberikan imbalan yang setimpal kepada mereka yang telah memberikan bantuan dan menjadikan semua bantuan tersebut sebagai ibadah, Aamiin Yaa Robbal ‘Aalamiin.

Surabaya, 25 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
TITLE PAGE	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Permasalahan	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Tinjauan tentang <i>Cycloid Mechanical Gear</i>	8
2.2.1 Konsep Dasar <i>Cycloid Mechanical Gear</i>	8
2.2.2 Dimensi <i>Cycloidal Disc</i> dan Pin Output	10
2.2.3 Torsi pada <i>Mechanical Cycloid Gear</i>	14
2.3 Tinjauan tentang <i>Magnetic Gear</i>	16
2.3.1 Konsep Dasar <i>Magnetic Gear</i>	16
2.3.2 Torsi pada Objek Elektromagnetik	18
2.3.3 <i>Drive Magnet Surface Current Density</i>	22
2.3.4 <i>External Flux Density Field</i>	23
2.3.5 Magnetisasi Paralel	23
2.4 Tinjauan tentang Magnet Permanen.....	23
2.4.1 Magnet Permanen	23
2.4.2 Sifat pada Magnet Permanen	25
2.4.3 Perkembangan Jenis Magnet Permanen.....	26
2.5 Tinjauan <i>Software</i> Simulasi	28

BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1 Penentuan Magnet Permanen	31
3.2 Perancangan Simulasi.....	33
3.3 Simulasi <i>Transient</i>	44
3.4 Simulasi <i>Magnetostatic</i>	47
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	53
4.1 Data Hasil Penelitian	53
4.2 Analisis Pengaruh Variasi <i>Airgap</i> terhadap Torsi	55
4.3 Analisis Pengaruh Variasi Jarak Eksentrik Poros	
Input terhadap Torsi	60
4.4 Desain <i>Cycloid Magentic Gear</i> yang Memiliki	
Densitas Torsi Tinggi	70
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	75
5.1 Kesimpulan.....	75
5.2 Saran.....	76
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	81
BIODATA PENULIS	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Desain <i>Cycloid Magnetic Gear</i> oleh Joergenesen..5
Gambar 2.2	Desain <i>Cycloid Magnetic Gear</i> oleh Li7
Gambar 2.3	Skema <i>Cycloid Mechanical Gear</i>8
Gambar 2.4	Dimensi <i>Cycloidal Disc</i>10
Gambar 2.5	Dimensi Pin Output11
Gambar 2.6	Arah Putaran Poros pada <i>Cycloid Mechanical Gear</i>14
Gambar 2.7	Gaya Kontak pada <i>Cycloid Mechanical Gear</i>15
Gambar 2.8	Sketsa <i>Spur Magnetic Gear</i> dan <i>Spur Mechanical Gear</i>16
Gambar 2.9	Jenis-Jenis <i>Magnetic Gear</i> dan <i>Mechanical Gear</i>18
Gambar 2.10	Ilustrasi Arah Vektor Gaya Magnet19
Gambar 2.11	Kurva Histerisis25
Gambar 2.12	Jenis-Jenis Magnet Permanen (a) NdFeB, (b) SmCo, (c) Alnico, (d) Ferit27
Gambar 2.13	Antarmuka <i>Software</i> Ansys Maxwell 3D29
Gambar 3.1	Magnet Permanen NdFeB N5233
Gambar 3.2	Visualisasi <i>Cycloid Magnetic Gear</i>35
Gambar 3.3	Desain <i>Cycloid Magnetic Gear</i>36
Gambar 3.4	Parameter Dimensi <i>Cycloid Magnetic Gear</i>36
Gambar 3.5	Region Simulasi38
Gambar 3.6	Pendefinisian Properti Material dan Arah Magnetisasi39
Gambar 3.7	Arah Magnetisasi Magnet Permanen40
Gambar 3.8	<i>Meshing</i> dengan Tipe <i>Fine</i>43
Gambar 3.9	Penentuan Parameter Torsi44
Gambar 3.10	<i>Band</i>45
Gambar 3.11	Pengaturan <i>Motion Setup</i>46
Gambar 3.12	Pengaturan <i>Transient Solve Setup</i>46
Gambar 3.13	Menu <i>Rectangular Plot of Transient Report</i>47
Gambar 3.14	Pengaturan Sudut <i>Inner Gear</i>48

Gambar 3.15	<i>Inner Gear</i> (a) Sebelum Diputar, (b) Sesudah Diputar	48
Gambar 3.16	Pengaturan <i>Magnetostatic Solve Setup</i>	49
Gambar 3.17	Menu <i>Solution Data</i>	49
Gambar 3.18	Pemilihan <i>XY Plane</i>	50
Gambar 3.19	Menu <i>Field Plot</i>	50
Gambar 3.20	Lintasan Grafik B_{total} , B_x , B_y , dan B_z	51
Gambar 3.21	Menu <i>Rectangular Plot of Field Report</i>	52
Gambar 4.1	Grafik Pengaruh Variasi <i>Airgap</i> terhadap Torsi ..	55
Gambar 4.2	Kontur Induksi Magnetik (B) dengan Jarak Eksentrik Poros Input 1 mm dan <i>Airgap</i> yang Bervariasi (a) $a = 0,2$ mm, (b) $a = 1$ mm, (c) $a = 2$ mm, (d) $a = 3$ mm	57
Gambar 4.3	Grafik Pengaruh Variasi <i>Airgap</i> terhadap Rata-Rata Induksi Magnetik ($B_{total,rata-rata}$) di Daerah <i>Airgap</i>	58
Gambar 4.4	Grafik Pengaruh Variasi Jarak Eksentrik Poros Input terhadap Torsi	60
Gambar 4.5	Kontur Induksi Magnetik (B) dengan <i>Airgap</i> 2 mm dan Jarak Eksentrik Poros Input yang Bervariasi (a) $e = 1$ mm, (b) $e = 2$ mm, (c) $e = 3$ mm, (d) $e = 4$ mm, (e) $e = 5$ mm	62
Gambar 4.6	Grafik Pengaruh Variasi Jarak Eksentrik Poros Input terhadap Rata-Rata Induksi Magnetik ($B_{total,rata-rata}$) di Daerah <i>Airgap</i>	64
Gambar 4.7	Grafik Induksi Magnetik (B_{total}) di Daerah <i>Airgap</i> dengan <i>Airgap</i> 2 mm dan Jarak Eksentrik Poros Input yang Bervariasi (a) $e = 1$ mm, (b) $e = 2$ mm, (c) $e = 3$ mm, (d) $e = 4$ mm, (e) $e = 5$ mm	66
Gambar 4.8	Grafik Induksi Magnetik (B) di Daerah <i>Airgap</i> dengan <i>Airgap</i> 2 mm dan Jarak Eksentrik Poros Input yang Bervariasi (a) B_x untuk $e = 1$ mm, (b) B_x untuk $e = 2$ mm, (c) B_y untuk $e = 1$ mm, (d) B_y untuk $e = 2$ mm, (e) B_z untuk $e = 1$ mm, (f) B_z untuk $e = 2$ mm	67

Gambar 4.9	Perbesaran Desain <i>Cycloid Magnetic Gear</i> di Daerah <i>Airgap</i> 270°	68
Gambar 4.10	Grafik Densitas Torsi	70
Gambar 4.11	Grafik Induksi Magnetik (B) di Daerah <i>Airgap</i> Dengan <i>Airgap</i> 0,2 mm dan Jarak Eksentrik Poros Input 3 mm (a) B_{total} , (b) B_x , (c) B_y , (d) B_z	66

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Hasil Optimasi Desain <i>Cycloid Mechanical Gear</i> oleh Joergensen	6
Tabel 2.2	Hasil Optimasi Desain <i>Cycloid Mechanical Gear</i> oleh Li	7
Tabel 2.3	Dimensi <i>Cycloid Mechanical Gear</i>	11
Tabel 2.4	Perbandingan Karakteristik Magnet Permanen	28
Tabel 3.1	Karakteristik Magnet Permanen NdFeB N52	32
Tabel 3.2	Verifikasi Hasil Simulasi	33
Tabel 3.3	Parameter Dimensi <i>Cycloid Magnetic Gear</i>	37
Tabel 3.4	Variabel dan Variasi Penelitian	37
Tabel 3.5	Dimensi <i>Cycloid Magnetic Gear</i>	38
Tabel 3.6	Dimensi Region Simulasi	39
Tabel 3.7	Arah Magnetisasi Magnet Permanen pada <i>Inner Gear</i> dan <i>Outer Gear</i>	41
Tabel 3.8	Dimensi <i>Band</i>	45
Tabel 4.1	Data Hasil Simulasi <i>Transient</i> dan <i>Magnetostatic</i>	53
Tabel 4.2	Perbandingan <i>Cycloid Magnetic Gear</i> dan <i>Cycloid Mechanical Gear</i>	71

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada beberapa dekade terakhir, *magnetic gear* mendapatkan perhatian banyak peneliti karena mampu bekerja sebagai transmisi daya tanpa adanya kontak antar gigi. Sehingga *magnetic gear* bisa menjadi solusi untuk *mechanical gear* yang dalam praktiknya sering mengalami kegagalan akibat tegangan kontak dan tegangan bending yang bekerja pada gigi-gigi yang bersinggungan. *Magnetic gear* terbentuk dari beberapa magnet yang disusun mengitari poros. Magnet-magnet tersebut berfungsi sebagai gigi magnetis. Dalam penyusunan pasangan *magnetic gear*, keduanya diberikan celah udara (*air gap*) antara *driver gear* dan *driven gear*. Daya dari *driver gear* ditransmisikan ke *driven gear* karena adanya gaya tolak-menolak antar kutub magnet yang berbeda. Hal ini menjadi kelebihan *magnetic gear* dalam menghindari kegagalan seperti pada *mechanical gear* karena adanya kontak langsung antar gigi-giginya. Kelebihan lain dari penggunaan *magnetic gear*, antara lain : tidak ada kelelahan (*fatigue*) mekanis, tidak ada pelumasan, proteksi beban berlebih (*overload*), densitas torsi yang cukup tinggi, dan berpotensi memiliki efisiensi yang sangat tinggi (Joergensen, 2010).

Pada tahun 2008, Joergensen telah melakukan penelitian mengenai *cycloid magnetic gear* dengan rasio gear -1:21 yang bertujuan mengoptimasi dimensi magnet permanen dan jarak eksentrik poros input untuk meningkatkan torsi. Pada tahun 2015, Li juga telah melakukan penelitian yang sama namun dengan rasio gear yang berbeda yaitu -1:25. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa variasi dimensi magnet permanen dan jarak eksentrik poros input sangat berpengaruh terhadap torsi yang dihasilkan. Dimensi magnet permanen yang besar belum tentu menghasilkan densitas torsi yang besar. Hal ini karena harus memperhatikan volume *gearbox*, semakin besar volume *gearbox*

maka pembagi torsi dalam menghitung densitas torsi menjadi semakin besar.

Selain kedua variasi di atas, hal yang perlu diperhatikan juga dalam desain yaitu variasi *airgap*. *Airgap* perlu diteliti karena sedikit pergeseran dari peletakannya sangat berpengaruh terhadap induksi magnetik yang dihasilkan. Induksi magnetik sendiri berpengaruh terhadap torsi.

Oleh karena itu, penulis melakukan penelitian mengenai *cycloidal magnetic gear* dengan rasio gear -1:30 dengan cara memvariasikan *airgap* dan jarak eksentrik poros input pada desain 3D kemudian dianalisis berdasarkan metode elemen hingga menggunakan *software* Ansys Maxwell 3D untuk mempelajari pengaruh variasi *airgap* dan jarak eksentrik poros input terhadap torsi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka pokok permasalahan yang akan dibahas dalam penelitian ini antara lain :

1. Bagaimana pengaruh variasi *airgap* terhadap torsi pada *cycloid magnetic gear*?
2. Bagaimana pengaruh variasi jarak eksentrik poros input terhadap torsi pada *cycloid magnetic gear*?
3. Bagaimana desain *cycloid magnetic gear* agar menghasilkan densitas torsi yang tinggi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dilakukan penelitian ini antara lain :

1. Dapat menjelaskan pengaruh variasi *airgap* terhadap torsi pada *cycloid magnetic gear*.
2. Dapat menjelaskan pengaruh variasi jarak eksentrik poros input terhadap torsi pada *cycloid magnetic gear*.
3. Dapat menentukan desain *cycloid magnetic gear* agar menghasilkan densitas torsi yang tinggi.

1.4 Batasan Permasalahan

Untuk menghindari melebarinya fokus penelitian, ditentukan suatu batasan permasalahan. Adapun batasan permasalahan tersebut antara lain :

1. Simulasi hanya dilakukan pada magnet permanen *inner gear* dan *outer gear*. Komponen penyusun seperti poros input, bantalan, *cycloidal disc*, dan poros output tidak ikut disimulasi.
2. Analisis kinerja *cycloid magnetic gear* ditinjau dari segi torsi output yang dihasilkan.
3. Simulasi menggunakan *software* Ansys Maxwell 3D.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini ialah sebagai berikut :

1. Pengetahuan mengenai pengaruh variasi *airgap* dan jarak eksentrik poros input pada *cycloid magnetic gear* terhadap torsi diharapkan dapat menjadi pertimbangan dalam pembuatan *cycloid magnetic gear*.
2. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan penelitian lebih lanjut dalam meningkatkan kinerja *cycloid magnetic gear* dari segi torsi yang dihasilkan.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

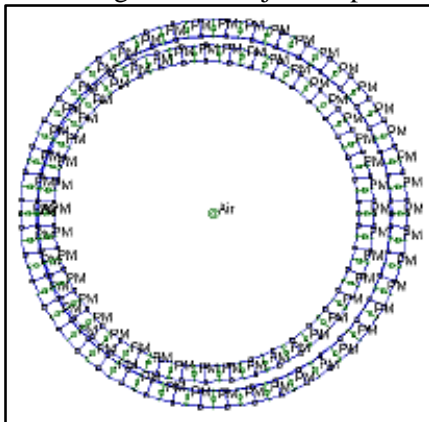
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini dijelaskan tinjauan pustaka yang berisi penelitian terdahulu dan teori yang diarahkan untuk menyusun kerangka pemikiran yang digunakan dalam penelitian. Teori yang dibahas yaitu tinjauan tentang *cycloid gear*, *magnetic gear*, magnet permanen, dan *software* simulasi.

2.1 Penelitian Terdahulu

Cycloid magnetic gear mulai dikenalkan Joergensen pada tahun 2008 melalui penelitian yang berjudul “*The Cycloid Permanent Magnetic Gear*”. Tujuan penelitiannya yaitu mengoptimasi dimensi magnet permanen dan jarak eksentrik poros input untuk meningkatkan densitas torsi. Rasio *gear* yang digunakan yaitu -1:21 dan magnet permanen yang digunakan yaitu NdFeB N42. Joergensen meneliti melalui simulasi menggunakan *software Magnetic Gear Program* dari Furlani dan divalidasi menggunakan *software* FEMM. Joergensen juga melakukan eksperimen untuk memverifikasi hasil simulasi. Desain *cycloid magnetic gear* oleh Joergensen ditunjukkan pada Gambar 2.2.



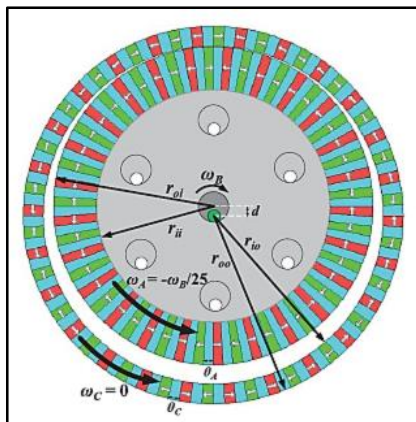
Gambar 2.1 Desain *Cycloid Magnetic Gear* oleh Joergensen (Joergensen, 2008)

Joergensen melakukan optimasi sebanyak tiga kali dengan mempertahankan *airgap* sebesar 0,5 mm dan didapatkan peningkatan densitas torsi di optimasi kedua dan ketiga. Hasil optimasi ketiga yang dilakukan oleh Joergensen disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Hasil Optimasi Desain *Cycloid Magnetic Gear* oleh Joergensen
(Joergensen, 2008)

Parameter	Batasan	Hasil	Satuan
L_{magnet}	$(30-240) \times 10^{-4}$	240×10^{-4}	m^2
R_{1i}	≥ 15	81	mm
R_{21}	-	105,1	mm
R_{1o}	-	110,4	mm
R_{2o}	≤ 140	123,9	mm
e	1 - 20	4,8	mm
Densitas torsi	183		kN.m/m^3

Pada tahun 2015, Li melakukan penelitian dengan tujuan yang sama dengan penelitian oleh Joergensen yaitu mengoptimasi dimensi magnet permanen dan jarak eksentrik poros input. Perbedaan antara penelitian Li dengan penelitian Joergensen yaitu Li menggunakan rasio *gear* -1:25 dan magnet permanen NdFeB N41SH. Penelitian Li diselesaikan melalui simulasi dengan menggunakan *software* JMAG dan divalidasi menggunakan *software* MagNet. Namun Li tidak melakukan eksperimen untuk memverifikasi hasil simulasi. Desain *cycloid magnetic gear* oleh Joergensen ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Desain *Cycloid Magnetic Gear* oleh Li (Li, 2015)

Li melakukan optimasi dengan variabel yang sama seperti yang dilakukan oleh Joergensen dan menggunakan *airgap* sebesar 0,5 mm. Hasil optimasi yang dilakukan oleh Li disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Hasil Optimasi Desain *Cycloid Magnetic Gear* oleh Li (Li, 2015)

Parameter	Batasan	Hasil	Satuan
R_{1i}	50 - 90	75	mm
R_{2i}	-	93,75	mm
R_{1o}	90 - 110	98	mm
R_{2o}	114	-	mm
e	2 - 5	3,75	mm
Densitas torsi	291		kN.m/m ³

Hasil penelitian Joergensen dan Li menunjukkan bahwa dimensi magnet permanen yang besar belum tentu menghasilkan densitas torsi yang besar. Hal ini karena harus memperhatikan

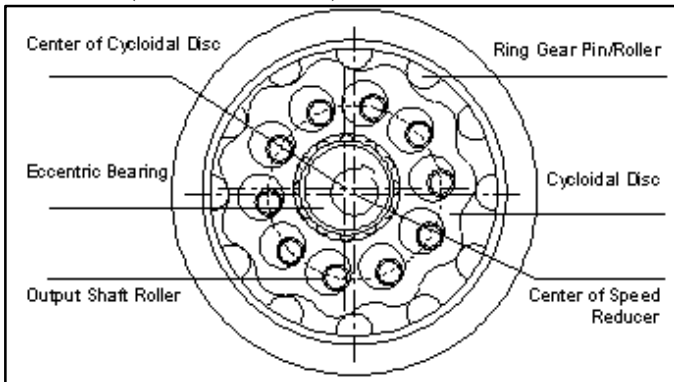
volume *gearbox*, semakin besar volume *gearbox* maka pembagi torsi dalam menghitung densitas torsi menjadi semakin besar. Sehingga sebelum membuat *cycloid magnetic gear* sebaiknya dilakukan analisis melalui simulasi untuk mendapatkan densitas torsi yang tinggi.

2.2 Tinjauan tentang *Cycloid Mechanical Gear*

2.2.1 Konsep Dasar *Cycloid Mechanical Gear*

Gear atau roda gigi dapat didefinisikan sebagai sebuah mekanisme yang mentransmisikan daya dari satu poros ke poros yang lain dengan menggunakan gigi. Perkembangan pengetahuan mengenai kinematika, kinetika, teknik produksi, dan material telah menghasilkan suatu sistem transmisi daya yang lebih unggul dari sistem transmisi daya lain. Sistem transmisi daya baru ini disebut *cycloid gear*.

Kata *cycloid*, dengan kata sifat *cycloidal*, berasal dari *hypocycloid* yang menggambarkan kurva yang menyusur oleh suatu titik pada keliling lingkaran yang lebih kecil yang berputar di dalam keliling lingkaran tetap yang lebih besar. Sama seperti kata-kata seperti *helical*, *worm*, *spur*, dan *bevel*, *cycloidal* adalah kata sifat umum; hanya untuk menggambarkan mekanisme *gear* pada *speed reducer* (www.darali.com).



Gambar 2.3 Skema *Cycloid Mechanical Gear*
(www.darali.com/page17.html)

Skema *cycloid gear* ditunjukkan pada Gambar 2.3. Torsi ditransmisikan dari poros input berkecepatan tinggi yang memutar *eccentric roller bearing* sehingga *cycloidal disc* berguling-guling di lintasan internal *stationary ring gear housing*. Gigi *cycloidal disc* kontak dengan *pin* dari *stationary ring gear* sehingga *cycloidal disc* berputar terbalik dengan kecepatan yang berkurang. Setiap putaran dari poros input berkecepatan tinggi akan menggerakkan *cycloidal disc* dengan jarak satu *tooth pitch* dalam arah putaran yang berlawanan. Kecepatan putaran yang berkurang dari *cycloidal disc* ditransmisikan ke poros output dengan menggunakan *output shaft roller* yang diproyeksikan melalui lubang yang terletak di *cycloidal disc*.

Perbandingan (rasio) putaran antara input dan output mengikuti dengan persamaan berikut.

$$i = \frac{z_p - z_m}{z_p} \quad (2.1)$$

dengan : z_m = jumlah *ring gear pin/roller* luar
 z_p = jumlah tonjolan pada *cycloidal disc*

Dengan demikian untuk *cycloid gear* pada gambar 2.1, $z_p - z_m = -1$, perbandingan putarannya menjadi sebagai berikut.

$$i = -\frac{1}{z_p} \quad (2.2)$$

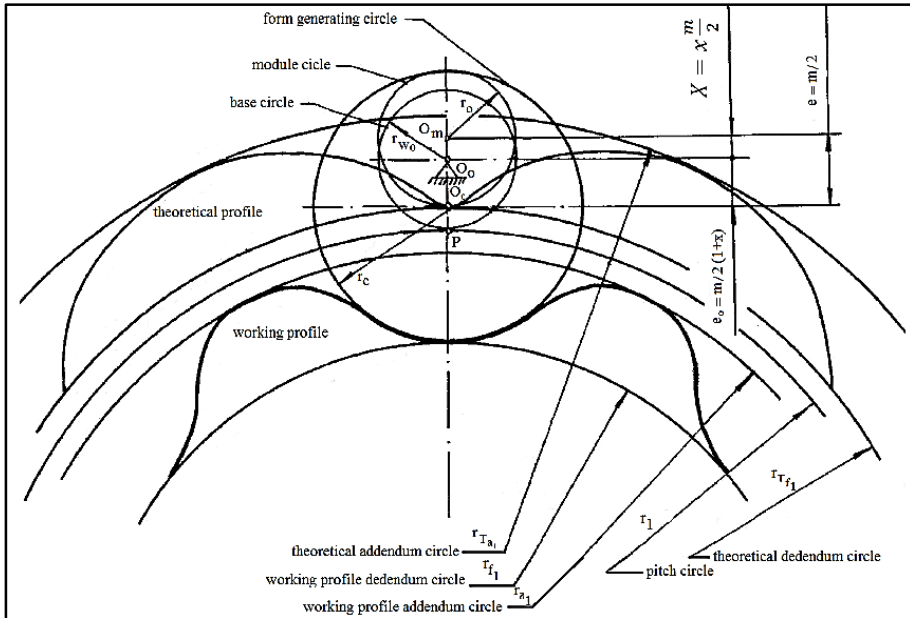
Dari persamaan (2.2) terlihat bahwa reduksi putaran *cycloid gear* dengan mudah diperbesar dengan memperbesar nilai z_p . Hal ini menunjukkan bahwa *cycloid gear* memiliki keunggulan yaitu reduksi yang besar dan kompak.

Keunggulan lainnya yaitu transmisi daya akan berlangsung melalui banyak titik yaitu sebanyak pin dalam yang ada, sehingga perbandingan beban dapat lebih merata. Kemudian beban transien berupa *shock* atau *overload* pun akan lebih terdistribusi ke banyak

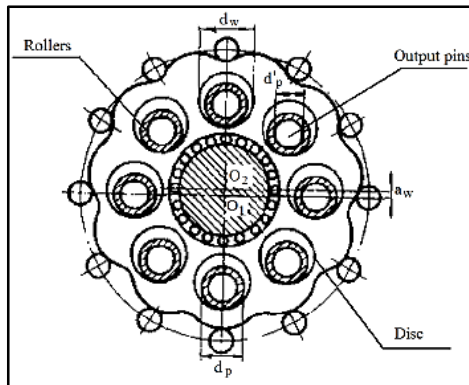
bagian pada *cycloidal disc*. Selain itu, transmisi daya menghasilkan resultan gaya yang balans karena gaya transmisi pada dua bagian *cycloidal disc* yang berhadapan (berbeda fasa 180°) akan saling menghilangkan. Hal ini memungkinkan dalam operasinya menjadi tenang hampir tanpa getaran (Sutjiatmo, 1982).

2.2.2 Dimensi Cycloidal Disc dan Pin Output

Parameter dasar dan dimensi pin output *cycloid mechanical gear* masing-masing ditunjukkan pada Gambar 2.4 dan Gambar 2.5. Parameter dasar diturunkan sehingga diperoleh formula dimensi *cycloidal disc*, pin, dan pin output yang disajikan pada Tabel 2.3.



Gambar 2.4 Dimensi *Cycloidal Disc*
(Ognyan, 1988)



Gambar 2.5 Dimensi Pin Output
(Zhengang, 1994)

Tabel 2.3 Dimensi *Cycloid Mechanical Gear*
(Borislavov, 2012)

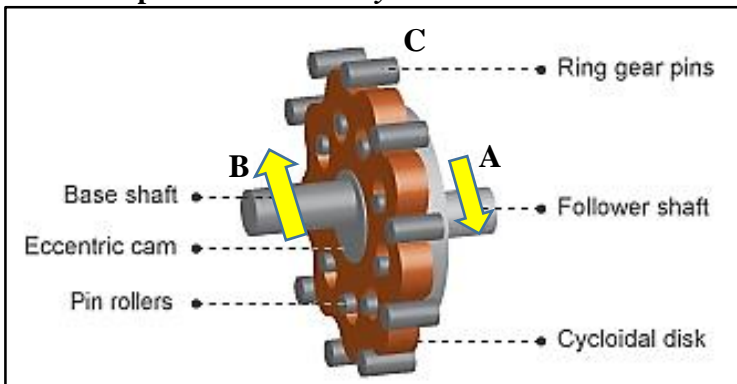
Simbol	Definisi	Rumus	Satuan
	Parameter dasar		
m	Module	$m = 2 \cdot r_0$	mm
r_c^*	Koefisien radius lingkaran pembuat profil	$r_c^* = 1$ Rekomendasi Ognyan, 1988	
x	Koefisien perpindahan instrumen pemotong profil	$1 - \frac{\sin \gamma_t}{\cos \left(\frac{\pi \varepsilon_{n, \min}}{z_1 + 1} \right)} \geq x$ $\geq 1 - \sqrt{1 - \frac{4(z_1 + 2)^3 r_c^{*2}}{27 z_1 (z_1 + 1)^2}}$	
	Dimensi Cycloidal Disc		
z_1	Jumlah gigi cycloidal disc		
d_1	Diameter lingkaran pitch	$d_1 = m \cdot z_1$	mm

d_{Tf1}	Diameter lingkaran dedendum teoritis	$d_{Tf1} = m(z_1 + x)$	mm
d_{Ta1}	Diameter lingkaran adendum teoritis	$d_{Ta1} = m(z_1 + 2 - x)$	mm
d_{f1}	Diameter lingkaran dedendum	$d_{f1} = m(z_1 + x - 2.r_c^*)$	mm
d_{a1}	Diameter lingkaran adendum	$d_{a1} = m(z_1 + 2 - x - 2.r_c^*)$	mm
h_1	Tinggi gigi	$h_1 = m(1 - x)$	mm
ρ_f	Radius lengkungan dedendum	$\rho_f = \frac{m}{2} \left[\frac{(z_1 + 1)x^2}{z_1 - x(z_1 + 1)} + 2.r_c^* \right]$	mm
ρ_a	Radius lengkungan adendum	$\rho_a = \frac{m}{2} \left[\frac{(z_1 + 1)(2 - x)^2}{(z_1 - x)^2(z_1 + 1) + 1} - 2.r_c^* \right]$	mm
ρ_{min}	Radius lengkungan lengkungan gigi minimal	$\rho_{min} = \frac{m}{2} \left[\frac{3(z_1 + 1)\sqrt{3z_1x(2 - x)}}{(z_1 + 2)^{\frac{3}{2}}} - 2.r_c^* \right]$	mm
λ	Koefisien pemendekan <i>cycloid</i>	$\lambda = 1 - x$	
B	Tebal <i>cycloidal disc</i>	$B = (0,1 \div 0,2).R_p$	mm
	Dimensi Pin		
z_2	Jumlah pin		
d_2	Diameter lingkaran <i>pitch</i>	$d_2 = m.z_2$	mm

d_c	Diameter pin	$d_c = 2 \cdot r_c^* \cdot m$	mm
d_{a2}	Diameter lingkaran addendum	$d_{a2} = m(z_2 - 2 \cdot r_c^*)$	mm
β	Sudut kontak	$\beta = \arcsin(1 - x)$	
	Dimensi Pin Output		
$F_{s \max}$	Gaya geser antara <i>roller</i> pin output dengan lubang <i>cycloidal disc</i>		N
Z_w	Jumlah pin output		
r_2	Jarak pin terhadap titik pusat		mm
T_g	Torsi yang diterima tiap pin output	$T_g = \frac{F_{s \max} \cdot Z_w \cdot r_2}{4,8}$	N.mm
δ	Jarak antar <i>cycloidal disc</i> (untuk <i>multi-stage</i>)		mm
r_w	Jarak pin output terhadap titik pusat		mm
σ_b	Tegangan tarik desain pin output		N/mm ²
σ_{FP}	Tegangan <i>bending</i> pin output	$\sigma_{FP} = 0,43 \cdot \sigma_b$	N/mm ²
d_p'	Diameter pin output	$d_p' \geq 36,6 \cdot \sqrt[3]{\frac{T_g(1,5 \cdot B + \delta)}{Z_w \cdot r_w \cdot \sigma_{FP}}}$	mm
d_p	Diameter <i>roller</i> pin output		mm

d_w	Diameter lubang <i>cycloidal disc</i>	$d_w = d_p + 2e$	mm
	Parameter Gear		
a_w	Jarak eksentrik	$a_w = e_0 = \frac{m}{2}(1 - x)$	mm
d_{w1}	Diameter <i>cycloidal disc</i> awal	$d_{w1} = m \cdot z_1(1 - x)$	mm
d_{w2}	Diameter pin awal	$d_{w2} = m \cdot z_2(1 - x)$	mm
l	Koefisien <i>non-centoroidity</i>	$l = \frac{d_2}{d_{w2}} = \frac{d_1}{d_{w1}} = \frac{1}{1 - x}$	
γ_{max}	Sudut maksimum transmisi gerakan	$\gamma_{max} = \arcsin(1 - x)$	
ψ_n	Sudut <i>beneficial overlapping</i>	$\psi_n = 2 \cdot \arccos\left(\frac{\sin \gamma_{allowable}}{1 - x}\right)$	
ε_n	Koefisien <i>beneficial overlapping</i>	$\varepsilon_n = \frac{z_2}{\pi} \arccos\left(\frac{\sin \gamma_{allowable}}{1 - x}\right)$	

2.2.3 Torsi pada *Mechanical Cycloid Gear*



Gambar 2.6 Arah Putaran Poros pada *Cycloid Mechanical Gear*

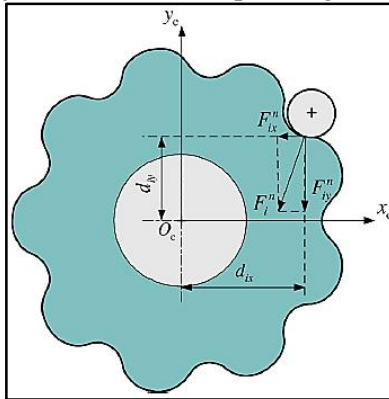
Torsi pada *mechanical cycloid gear* terjadi pada poros input, pin, dan poros output. Torsi poros output dapat diketahui melalui torsi yang terjadi pada *cycloidal disc*. Ketiga torsi tersebut dihubungkan melalui persamaan berikut (Joergensen, 2010).

$$T_A = T_B \frac{z_p}{z_p - z_m} \quad (2.3)$$

$$T_C = -T_B + T_A = T_B \frac{z_m}{z_m - z_p} \quad (2.4)$$

$$T_C = T_A \frac{z_m}{z_p} \quad (2.5)$$

Torsi pada pin terjadi karena adanya gaya kontak (F_i) antara pin dengan *cycloidal disc*. Pada gambar berikut ditunjukkan gaya-gaya yang bekerja antara salah satu pin dengan *cycloidal disc*.



Gambar 2.7 Gaya Kontak pada *Cycloid Mechanical Gear*
(Xu, 2016)

Dalam sistem koordinat kartesian, gaya kontak (F_i) diuraikan ke sumbu-x dan sumbu-y yang kemudian disebut F_{ix}^n dan F_{iy}^n . Selanjutnya torsi dihitung dari perkalian gaya-gaya tersebut dengan jarak pin ke titik pusat. Sehingga diperoleh persamaan berikut.

$$T_i^n = d_{iy}F_{ix}^n - d_{ix}F_{iy}^n \quad (2.6)$$

Dengan mengkalkulasi gaya kontak yang terjadi pada semua pin yang bersinggungan, maka persamaan resultan gaya kontak yang terjadi ialah sebagai berikut.

$$F_x = \sum_{i=1}^N F_{ix}^n \quad (2.7)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^N F_{iy}^n \quad (2.8)$$

dengan : N = jumlah pin yang bersinggungan dengan *cycloidal disc*

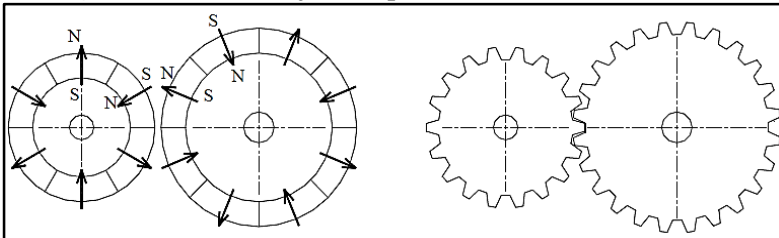
Sehingga diperoleh persamaan resultan torsi yang bekerja pada *mechanical cycloid gear* yaitu sebagai berikut.

$$T = \sum_{i=1}^N T_i^n \quad (2.9)$$

2.3 Tinjauan tentang *Magnetic Gear*

2.3.1 Konsep Dasar *Magnetic Gear*

Beberapa *magnetic gear* memiliki kemiripan konstruksi dengan *mechanical gear*, misalnya jenis *spur gear*. Kesamaan dari kedua *gear* tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Sketsa *Spur Magnetic Gear* dan *Spur Mechanical Gear*

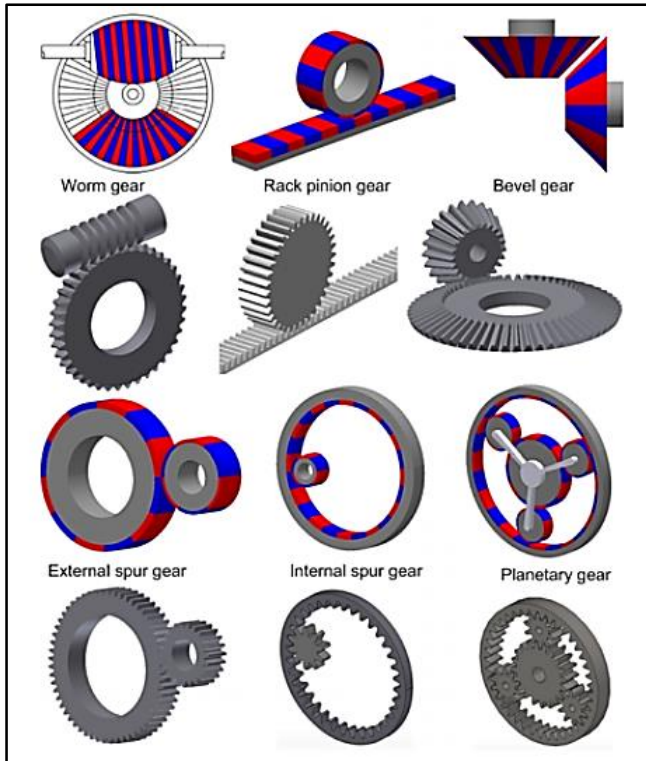
(Joergensen, 2010)

Mechanical gear menggunakan gigi dari baja untuk mentransferkan torsi dengan cara melakukan kontak fisik antar gigi. *Mechanical gear* dalam praktiknya sering mengalami kegagalan. Pada dasarnya, sumber kegagalannya berasal dari dua jenis tegangan yang bekerja pada gigi-gigi yang bersinggungan, yaitu tegangan kontak dan tegangan bending. Secara umum, tegangan kontak menyebabkan kegagalan berupa *wear*, *surface fatigue* dan *plastic wear*. Sedangkan tegangan bending menyebabkan *breakage* (Aji, 2017).

Sedangkan *magnetic gear* tidak mengalami kegagalan akibat tegangan kontak dan tegangan beding seperti pada *mechanical gear* karena tidak terjadi kontak langsung antar gigi. Hal ini terjadi karena *magnetic gear* menggunakan gigi yang terbuat dari magnet permanen untuk mentransferkan torsi (Joergensen, 2010). Magnet permanen disusun mengitari poros yang berfungsi sebagai gigi magnetik. Dalam penyusunan pasangan *magnetic gear*, keduanya diberikan celah udara (*air gap*) antara *driver gear* dan *driven gear*. Daya dari *driver gear* ditransmisikan ke *driven gear* karena adanya gaya tolak-menolak antar kutub magnet yang berbeda. Sehingga transmisi daya *magnetic gear* dapat terjadi walaupun terdapat *airgap* antara *driver gear* dan *driven gear*.

Selain menimbulkan keausan, mekanisme kontak antar gigi mekanik pada *mechanical gear* juga menyebabkan getaran, kebisingan, gesekan, dan kehilangan energi. Kelemahan tersebut membatasi penggunaan *mechanical gear* secara signifikan. Dari hal tersebut *magnetic gear* mendapatkan banyak perhatian ilmiah karena kelebihanannya, khususnya *magnetic gear* dengan torsi *output* tinggi dan kepadatan torsi tinggi telah diteliti secara ekstensif (Hao, 2016).

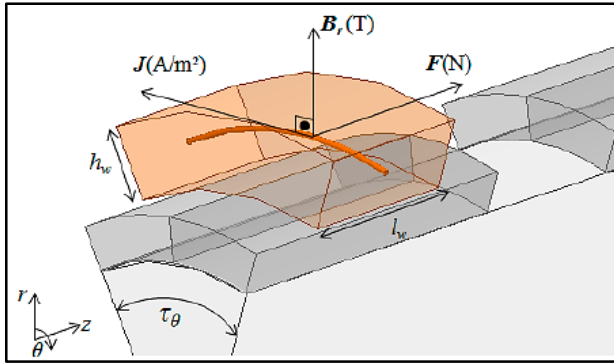
Adapun beberapa contoh lain dari kemiripan antara konstruksi *magnetic gear* dengan *mechanical gear* ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Jenis-Jenis *Magnetic Gear* dan *Mechanical Gear* (Matthee, 2017)

2.3.2 Torsi pada Objek Elektromagnetik

Seperti pada umumnya, torsi merupakan integral perkalian dari jarak dan gaya. Pada objek elektromagnetik, gaya yang terjadi merupakan gaya magnet yang didapatkan melalui perkalian silang dari *current density* (J) dan *flux density field* (B) (Eckert, 2014). Ilustrasi arah vektor gaya magnet dengan koordinat silinder ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Ilustrasi Arah Vektor Gaya Magnet (Eckert, 2014)

$$dF = (J \times B)dv \quad (2.10)$$

dengan F = gaya magnet permanen (N)
 J = *current density* (A/m²)
 B = *flux density field* (Wb/m²)

Untuk menentukan torsi pada *drive gear*, hal pertama yang dilakukan adalah mengurai sistem menjadi distribusi yang seimbang antara *volume current densities* (J_m) dan *surface current densities* (j_m). Persamaan torsi terdiri atas dua integral dimana V dan S secara berurutan adalah volume dan permukaan magnet (Furlani, 2000).

$$T = \int_V r \times (J_m \times B_{ext})r dr d\theta + \int_S r \times (j_m \times B_{ext})da \quad (2.11)$$

dengan T = torsi (N.m)
 r = jarak magnet permanen ke titik pusat
 J_m = *volume current density* (A/m²)
 j_m = *surface current density* (A/m²)
 B_{ext} = *external flux density field* (Wb/m²)

Karena $\mathbf{Jm} = \nabla \times \mathbf{M} = 0$, maka integral volume di atas menjadi nol dan yang tersisa hanya hasil integral permukaan. Terdapat dua integrasi pada integral permukaan, yaitu integrasi permukaan radial dan integrasi permukaan tangensial. Integrasi permukaan radial dilakukan pada arah radial dari bidang permukaan magnet. Persamaan torsi permukaan radial didapatkan dengan menggunakan metode integrasi Simpson. Berikut adalah persamaan torsi permukaan radial.

$$\begin{aligned}
 T_r(\theta) = & \frac{2M_s \cos\left(\frac{\pi}{N_{pole}}\right) L(R_2 - R_1)}{N_r} \\
 & \times \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_r} (-1)^p S_r(q) r(q) \\
 & \times [\cos(\theta_{edge}) B_x^{ext} + \sin(\theta_{edge}) B_y^{ext}] \quad (2.12)
 \end{aligned}$$

dengan $T_r(\emptyset)$ = torsi radial (N.m)
 M_s = magnetisasi *source gear* (A/m)
 N_r = koefisien pada parameter dari integrasi
 N_{pole} = jumlah magnet pada *drive gear*
 L = panjang/tinggi magnet (m)
 R_1 = radius dalam *drive gear* (m)
 R_2 = radius luar *drive gear* (m)
 p = jumlah kutub magnet
 q = koefisien pada parameter dari integrasi
 $S_r(q)$ = parameter dari integrasi
 \emptyset_{edge} = sudut tertentu dari *drive gear* (rad)
 θ = sudut putar *drive magnet* (rad)
 B_x^{ext} = *x-direction external flux density field* (Wb/m²)
 B_y^{ext} = *y-direction external flux density field* (Wb/m²)

Sedangkan untuk integrasi permukaan tangensial dilakukan pada dua permukaan radial. Persamaan torsi permukaan tangensial

didapatkan dengan menggunakan metode integrasi Simpson. Berikut merupakan persamaan torsi permukaan tangensial.

$$\begin{aligned}
 T_{t1}(\theta) = & - \frac{M_s L R_2^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}} \right)}{N_t} \\
 & \times \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_t} (-1)^p S_r(q) \sin(\phi(q)) \\
 & \times \left[\cos \left(\phi(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \theta \right) B_x^{ext}(R_1) \right. \\
 & \quad \left. + \sin \left(\phi(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \theta \right) B_y^{ext}(R_1) \right] \quad (2.13)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 T_{t2}(\theta) = & \frac{M_s L R_2^2 \left(\frac{2\pi}{N_{pole}} \right)}{N_t} \\
 & \times \sum_{p=0}^{N_{pole}-1} \sum_{q=0}^{N_t} (-1)^p S_r(q) \sin(\phi(q)) \\
 & \times \left[\cos \left(\phi(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \theta \right) B_x^{ext}(R_2) \right. \\
 & \quad \left. + \sin \left(\phi(q) + p \frac{2\pi}{N_{pole}} + \theta \right) B_y^{ext}(R_2) \right] \quad (2.14)
 \end{aligned}$$

dengan $T_t(\phi)$ = torsi tangensial (N.m)
 M_s = magnetisasi *source gear* (A/m)
 N_t = koefisien pada parameter dari integrasi
 N_{pole} = jumlah magnet pada *drive gear*
 L = panjang/tinggi magnet (m)
 R_1 = radius dalam *drive gear* (m)
 R_2 = radius luar *drive gear* (m)
 p = jumlah kutub magnet

- q = koefisien pada parameter dari integrasi
 $S_r(q)$ = parameter dari integrasi
 \emptyset = sudut tertentu dari *drive gear* (rad)
 θ = sudut putar *drive magnet* (rad)
 B_x^{ext} = *x-direction external flux density field* (Wb/m²)
 B_y^{ext} = *y-direction external flux density field* (Wb/m²)

Persamaan total torsi dari *drive magnet* didapatkan dari penjumlahan dari integral permukaan. Berikut adalah persamaannya.

$$T(\theta) = T_r(\theta) + T_{t1}(\theta) + T_{t2}(\theta) \quad (2.15)$$

- dengan $T(\theta)$ = torsi total (Nm)
 $T_r(\theta)$ = torsi radial (Nm)
 $T_{t1}(\theta)$ = torsi tangensial dalam (Nm)
 $T_{t2}(\theta)$ = torsi tangensial luar (Nm)

2.3.3 Drive Magnet Surface Current Density

Kesetimbangan *surface current density* adalah distribusi *current density* yang memberikan induksi magnetik yang sama seperti magnet permanen. Persamaan *current density* untuk permukaan luar dan dalam adalah sebagai berikut.

$$j_m(p, r, \theta, \emptyset) = \begin{cases} M_s \sin(\emptyset) \hat{z}, (r = R_2) \\ -M_s \cos(\emptyset) \hat{z}, (r = R_1) \end{cases} \quad (2.16)$$

$$\theta - \frac{\pi}{N_{pole}}(1 + 2p) \leq \emptyset \leq \theta + \frac{\pi}{N_{pole}}(1 + 2p) \quad (2.17)$$

- dengan j_m = *surface current density* (A/m²)
 M_s = magnetisasi *source magnet* (A/m)
 \emptyset = sudut tertentu dari *drive magnet* (rad)
 \hat{z} = vektor sumbu-z

2.3.4 External Flux Density Field

Berikut adalah persamaan untuk B_x^{ext} dan B_y^{ext} pada *drive magnet* yang dihasilkan dari medan *source gear*.

$$B_x^{\text{ext}}(r, \theta) = B_{r'}^{\text{ext}} \cos(\theta') - B_{\theta'}^{\text{ext}} \sin(\theta') \quad (2.18)$$

$$B_y^{\text{ext}}(r, \theta) = B_{r'}^{\text{ext}} \sin(\theta') + B_{\theta'}^{\text{ext}} \cos(\theta') \quad (2.19)$$

dengan B_x^{ext} = *x-direction external flux density field* (Wb/m²)
 B_y^{ext} = *y-direction external flux density field* (Wb/m²)
 $B_{r'}^{\text{ext}}$ = *radial external flux density field* (Wb/m²)
 $B_{\theta'}^{\text{ext}}$ = *tangential external flux density field* (Wb/m²)
 r' = transformasi radius ke koordinat *drive magnet*
 θ' = transformasi tangensial ke koordinat *drive magnet*

2.3.5 Magnetisasi Paralel

Magnetisasi paralel terdapat pada arah radial dan tangensial. Berikut adalah persamaan untuk mendapatkan magnetisasi paralel.

$$M_S(r, \theta) = M_r \cdot \hat{r} + M_\theta \cdot \hat{\theta} \quad (2.20)$$

dengan M_r = magnetisasi arah radial (A/m)
 M_θ = magnetisasi arah tangensial (A/m)

2.4 Tinjauan tentang Magnet Permanen

2.4.1 Magnet Permanen

Magnet adalah objek yang memiliki medan magnet. Medan magnet adalah daerah di sekitar magnet yang masih merasakan adanya gaya magnet. Arah magnetisasi di suatu titik didefinisikan sebagai arah yang ditunjukkan oleh kutub utara jarum kompas ketika ditempatkan pada titik tersebut. (Prayoga, 2014). Medan magnet dapat tercipta melalui medan listrik yang berubah secara linier terhadap waktu atau arus searah (Spaldin, 2003), seperti pada kawat yang membawa arus listrik. Medan magnet juga dapat

diciptakan oleh dipol magnetik orbital dari elektron dalam sebuah atom, seperti pada magnet permanen (Gignoux, 2005). Adanya medan magnet menjadikan magnet dapat menarik, menolak ataupun memengaruhi bahan magnetik lainnya tanpa bersentuhan secara langsung (Kristyanto, 2010).

Dengan mendefinisikan medan magnet (H) dalam kutub magnet, gaya antara dua kutub magnet adalah berbanding lurus dengan perkalian kekuatan kedua kutub tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua magnet tersebut, dituliskan dalam persamaan matematis sebagai berikut (Spaldin, 2003).

$$F = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_1 p_2}{r^2} \quad (2.21)$$

dengan F = Gaya antara dua kutub magnet permanen (N)
 μ_0 = permeabilitas udara hampa = $4\pi \times 10^{-7}$ (Wb/A.m)
 p_1 = kekuatan kutub magnet permanen 1 (A.m)
 p_2 = kekuatan kutub magnet permanen 2 (A.m)
 r = jarak antara magnet permanen 1 dan 2 (m)

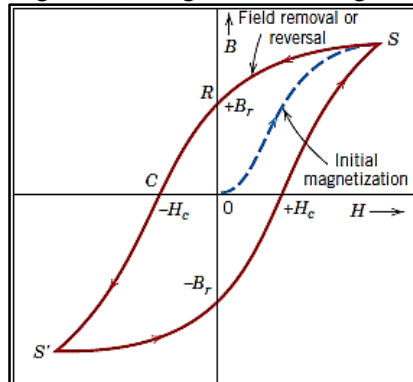
Magnet permanen biasanya digunakan untuk menghasilkan medan magnet sebagai salah satu komponen konversi energi elektromekanik di sejumlah alat elektromagnetik, seperti aktuator, motor dan generator magnet permanen. Magnet permanen memiliki beberapa keuntungan dibanding pembangkit fluks dari arus atau elektromagnet (misal : solenoid) (Gignoux, 2005). Keuntungan tersebut antara lain : a) Tanpa memerlukan energi listrik untuk melakukan pemancaran medan magnet, sehingga berdampak pada peningkatan efisiensi; b) Menghasilkan tenaga dan torsi per volume yang lebih besar; c) Sederhana dalam konstruksi dan pemeliharaan.

2.4.2 Sifat pada Magnet Permanen

Sifat penting yang digunakan untuk membandingkan magnet permanen antara lain : *curie temperature* (T_c), *residual induction* (B_r), *coercivity* (H_c), dan *maximum energy product* $[(BH)_{max}]$ (Parker, 1990).

Setiap magnet permanen akan mulai berkurang medan magnetnya apabila diletakkan di tempat yang memiliki temperatur tinggi. Batas atas temperatur yang menjadikan magnet permanen kehabisan medan magnetnya disebut *curie temperature* (T_c).

Sifat lain dari magnet permanen diperlihatkan dalam kurva histeresis yang ditunjukkan pada Gambar 2.11, yaitu hubungan antara induksi magnet (B) dengan medan magnet (H).



Gambar 2.11 Kurva Histeresis
(Kristyanto, 2010)

Pada proses magnetisasi, ketika suatu objek dimasukkan ke dalam suatu medan magnet eksternal (H), garis-garis gaya magnet yang berada di sekitar objek akan dihipunkan ke dalam objek tersebut. Sehingga pada objek timbul medan magnet yang disebabkan oleh medan magnet eksternal (H) dan medan magnet internal akibat sifat ferromagnetik objek itu sendiri. Total medan magnet yang terjadi pada objek tersebut dinamakan sebagai induksi magnet (B). Besarnya induksi magnet (B) bergantung pada medan magnet eksternal (H) yang diberikan pada objek. Jika

medan magnet eksternal (H) ditingkatkan, maka induksi magnet (B) akan meningkat hingga mencapai titik saturasi (S), yaitu titik dimana induksi magnet (B) selalu konstan walaupun medan magnet eksternal (H) dinaikkan terus.

Selanjutnya pada proses demagnetisasi, jika medan magnet eksternal (H) diturunkan hingga bernilai 0, maka akan timbul *residual induction* atau remanensi (B_r), yaitu kondisi dimana objek tetap memiliki induksi magnet (B) walaupun medan magnet eksternal (H) sudah ditiadakan. Agar induksi magnet (B) bernilai 0, maka objek diberikan *coercivity* (H_c), yaitu medan magnet yang berlawanan arah terhadap arah medan magnet eksternal di awal. Loop yang terbentuk dari proses di atas disebut kurva histerisis. Luas daerah di bagian dalam kurva menunjukkan jumlah energi yang hilang selama proses magnetisasi dan demagnetisasi.

Dari penjelasan di atas, dapat diketahui bahwa semakin besar *residual induction* (B_r) dan *coercivity* (H_c) maka semakin bagus sifat objek tersebut untuk mempertahankan medan magnet eksternal (H) (Vlack, 2001).

2.4.3 Perkembangan Jenis Magnet Permanen

Penelitian modern mengenai magnet permanen ditujukan ke berbagai arah luas seperti mengujicobakan berbagai bahan untuk dibuat sebagai magnet permanen, namun hingga saat ini hanya ada empat jenis magnet yang umum digunakan. Yakni AlNiCo, Ferit, SmCo₅ dan yang paling baru ditemukan, NdFeB (Akbar, 2011).

Perkembangan pembuatan magnet permanen dimulai sejak abad ke-19 dan terus dikembangkan sampai sekarang. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan produk energi maksimum pada magnet. Sekitar abad ke-19, magnet permanen dibuat pertama kali berupa magnet baja karbon, yaitu campuran antara besi dan karbon, tetapi jenis magnet ini mudah dimagnetisasi dan medan koersifitasnya rendah.

Sekitar dekade 1930, magnet permanen berkembang sejak ditemukannya magnet AlNiCo (Aluminium Nikel Cobalt). Merupakan magnet permanen modern pertama yang dibuat,

paduan dari ferromagnetik dan paramagnetik yang disebut juga ferrimagnetik. Magnet ini memiliki temperatur *curie* yang tinggi, sekitar 850°C. Perkembangan selanjutnya adalah sekitar tahun 1960-an, ditandainya penemuan magnet keras, ferroxdur (Ferit), dengan senyawa $\text{BaFe}_{12}\text{O}_{19}$ atau $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$.

Jenis magnet ini tergolong ferrimagnetik karena paduan antara unsur ferromagnetik dan paramagnetik. Jenis ini merupakan magnet yang sering diproduksi pada dekade terakhir ini. Memiliki struktur heksagonal dan energi koersifitas yang cukup tinggi, meskipun energi maksimum dari jenis magnet ini tergolong rendah. Perkembangan selanjutnya ditemukan magnet SmCo (Samarium Cobalt) pada akhir 1960. Magnet ini memiliki energi maksimum yang tinggi dibandingkan dengan magnet keras lainnya, tetapi memiliki kelemahan dimana biaya produksinya yang tinggi.

Perkembangan magnet selanjutnya yaitu magnet NdFeB (Neodymium Ferit Boron). Diproduksi pertama kali pada tahun 1984. Memiliki energi maksimum yang paling tinggi dibandingkan jenis magnet yang lain. Kerugian dari magnet ini di antaranya adalah biaya produksi yang tinggi karena unsur Nd yang jarang ditemui dan memiliki temperatur *curie* yang rendah (Zulkifly, 2008). Potret keempat ragam magnet permanen ditunjukkan pada Gambar 2.12.



(a) (b) (c) (d)
Gambar 2.12 Jenis-Jenis Magnet Permanen (a) NdFeB, (b) SmCo, (c) Alnico, (d) Ferit
 (Akbar, 2011)

Menentukan jenis magnet permanen untuk digunakan dalam kehidupan sehari-hari sangatlah penting. Hal ini karena masing-masing jenis memiliki kelebihan dan kekurangan pada karakteristiknya. Misalnya NdFeB memiliki kelebihan pada *residual induction* (Br) dimana rentangan nilainya tinggi, namun NdFeB memiliki *curie tempertature* (Tc) yang rendah. Sehingga dalam pemilihan magnet permanen harus disesuaikan dengan kebutuhan karakteristiknya. Perbandingan karakteristik magnet permanen disajikan secara kualitatif pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Perbandingan Karakteristik Magnet Permanen
(www.duramag.com/materials)

Jenis Magnet	<i>Residual Induction, Br</i> (T)	<i>Coercivity, Hc</i> (A/m)	<i>Maximum Energy Product, (BH)max</i> (MGOe)	<i>Curie Temperature, Tc</i> (°C)
Ferit	0,23 - 0,4	148.000 - 240.000	1,05 - 3,8	450 - 460
Alnico	0,7 - 1,3	40.000 - 139.000	1,5 - 9	740 - 860
SmCo	0,77 - 1,18	613.000 - 848.000	15 - 32	800 - 850
NdFeB	1,18 - 1,48	836.000 - 915.000	34 - 53	312 - 380

2.5 Tinjauan Software Simulasi

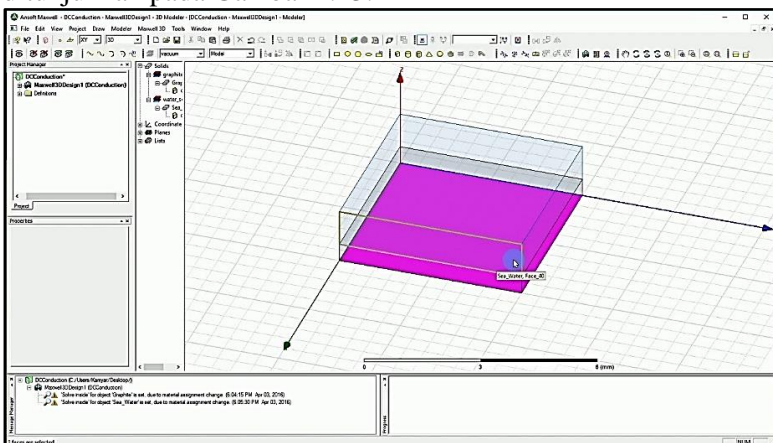
Metode elemen hingga merupakan pendekatan numerik dimana bidang telaah dibagi menjadi banyak daerah sederhana atau elemen, biasa disebut proses *meshing*, kemudian masing-masing daerah mempergunakan persamaan secara khusus. Komputasi ini dikerjakan oleh *solver* di dalam *software* secara simultan. Pengembangan dan penerapan metode ini mulai dikenalkan untuk menganalisis permasalahan pada *electromagnetic* pada tahun 1970-an (Tera Analysis, 2010).

Terdapat beberapa bentuk elemen *meshing*, antara lain : *tetrahedral*, *hexahedral*, *prism*, dan *pyramid*. Dalam pemilihan bentuk *meshing*, hal yang perlu diperhatikan yaitu *hardware resource* dan waktu penyelesaian. Penggunaan bentuk *hexahedral*

mampu menghasilkan hasil simulasi yang lebih valid dan memiliki jumlah elemen yang lebih sedikit sehingga waktu penyelesaiannya lebih cepat. Namun penggunaan bentuk *hexahedral* memiliki kekurangan yaitu tidak dapat digunakan pada objek yang memiliki bentuk kompleks seperti objek yang memiliki lengkungan atau objek yang lancip dengan sudut yang kecil. Bentuk *tetrahedral* dapat menjadi solusi untuk objek yang memiliki bentuk kompleks karena sangat mudah menyesuaikan dengan berbagai bentuk objek.

Kuantitas utama yang dipecahkan dari permasalahan di bidang *electromagnetic* yaitu medan magnet (H) dan kerapatan arus (J), sementara induksi magnetik (B) dihitung secara otomatis dari medan magnet (H). Kemudian dari kuantitas utama tersebut dapat diturunkan menjadi beberapa kuantitas, antara lain : gaya, torsi, *fluks linkage* dan *core loss* (ANSOFT, 2006).

Software komputasi dalam bidang *electromagnetic* yang cukup handal dan memadai menurut hasil penelusuran penulis adalah Ansys Maxwell 3D dari ANSOFT *Software* ini memiliki antarmuka yang mudah dipahami bagi pemula dan mampu menyajikan data dengan sangat baik. Tampilan antarmuka *software* Ansys Maxwell 3D yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Antarmuka *Software* Ansys Maxwell 3D

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini dijelaskan metode penelitian yang digunakan dalam penelitian. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode elemen hingga agar mampu menyelesaikan permasalahan secara efisien untuk variasi penelitian yang banyak.

3.1 Penentuan Magnet Permanen

Dalam penelitian ini, rasio *cycloid magnetic gear* yang direncanakan yaitu -1:30. Selisih jumlah magnet permanen untuk *inner gear* dan *outer gear* yang dipilih harus genap (2, 4, 6, dst.) agar arah magnetisasi magnet permanen yang berdekatan bisa berlawanan arah. Penulis memilih selisih 2 agar tidak terlalu banyak magnet permanen yang digunakan sebagai gigi magnetik. Kemudian penentuan jumlah magnet permanen untuk *inner gear* dan *outer gear* dilakukan dengan mengikuti persamaan rasio *cycloid magnetic gear* sebagai berikut.

$$i = \frac{z_p - z_m}{z_p}$$

dengan : z_m = jumlah magnet permanen untuk *outer gear*
 z_p = jumlah magnet permanen untuk *inner gear*

maka didapatkan z_p dan z_m

$$-\frac{1}{30} = -\frac{2}{z_p}$$
$$z_p = 60$$

$$z_p - z_m = -2$$
$$60 - z_m = -2$$
$$z_m = 62$$

Dari perhitungan di atas, didapatkan jumlah magnet permanen untuk *inner gear* dan *outer gear* masing-masing yaitu 60 dan 62 buah.

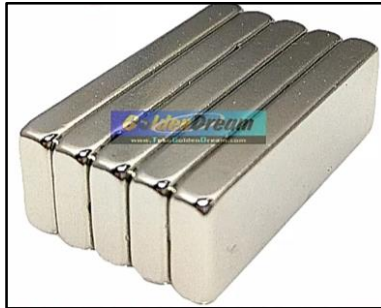
Magnet permanen yang digunakan dalam penelitian ini yaitu NdFeB (Neodymium-Iron-Boron) tipe N52. NdFeB memiliki *maximum energy product* (BHmax) paling tinggi, yaitu hingga 52 MGOe. BHmax berpengaruh terhadap besarnya induksi magnetik. Sedangkan torsi pada *magnetic gear* dipengaruhi oleh induksi magnetik dari magnet permanen. Sehingga semakin besar induksi magnetik maka semakin besar torsi yang dihasilkan. Oleh karena itu, dipilih magnet permanen NdFeB N52 untuk mendapatkan torsi yang tinggi. Karakteristik magnet permanen lebih lengkap mengenai magnet NdFeB N52 disajikan pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Karakteristik Magnet Permanen NdFeB N52
(Software FEMM)

Karakteristik	Besaran	Satuan
<i>Residual Induction, Br</i>	1,478	T
<i>Relative Permeability, μ_r</i>	1,319595	
<i>Coercivity, Hc</i>	891.300	A/m
<i>Maximum Energy Product, (BH)max</i>	52	MGOe

Sedangkan penentuan dimensi magnet permanen mengacu dengan yang tersedia di pasaran. Penulis memilih magnet permanen berbentuk balok lurus yang dipasarkan oleh distributor lokal Golden Dream, yang memiliki ukuran 4 x 10 x 30 (mm) dengan pelapisan dari nikel. Magnet permanen tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.2. Dalam kebanyakan jurnal penelitian, magnet permanen yang digunakan yaitu berbentuk balok melengkung agar mendapatkan distribusi induksi magnetik yang lebih besar. Namun dalam melakukan eksperimen, kenyataannya mereka menggunakan magnet permanen berbentuk balok lurus karena tidak tersedia magnet permanen berbentuk balok melengkung sesuai desain mereka. Sehingga hal tersebut

menimbulkan ketidaksesuaian antara hasil simulasi dengan hasil eksperimen.



Gambar 3.1 Magnet Permanen NdFeB N52
(www.tokopedia.com)

3.2 Perancangan Simulasi

Simulasi ditujukan untuk melakukan analisis secara komputasi tanpa melakukan eksperimen secara langsung. Simulasi dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan *software* Ansys Maxwell 3D berbasis metode elemen hingga. Simulasi digunakan agar mampu menyelesaikan permasalahan secara efisien untuk variasi penelitian yang banyak.

Dalam melakukan simulasi harus dilakukan validasi dan verifikasi agar memperoleh hasil yang akurat sesuai dengan kenyataan. Namun karena adanya keterbatasan alat dan biaya, validasi tidak dapat dilakukan secara langsung dengan membuat prototype *cycloid magnetic gear*. Sehingga penulis hanya melakukan verifikasi dengan cara mencoba simulasi ulang desain *cycloid magnetic gear* penelitian terdahulu oleh Joergensen (2010).

Tabel 3.2 Verifikasi Hasil Simulasi

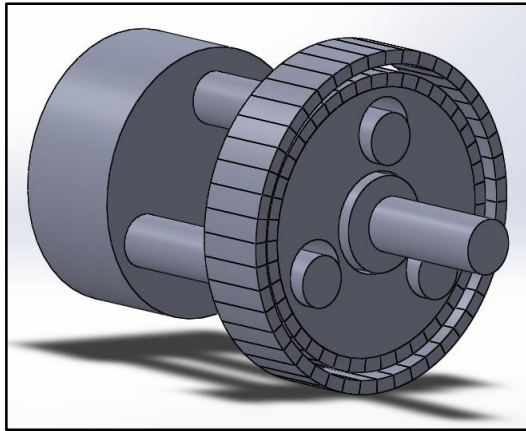
Tipe Simulasi	Torsi Maksimal	
	Joergensen (2010)	Razaq (2018)
<i>Transient</i>	45,44591 N.m	45,323 N.m
<i>Magnetostatic</i>	-	44,881 N.m

Software yang digunakan Joergensen (2010) yaitu FEMM, sedangkan penulis mencoba simulasi desain *cycloid magnetic gear* dari Joergensen (2010) dengan menggunakan *software* Ansys Maxwell 3D. Pada Tabel 3.2 dapat dilihat bahwa untuk simulasi *transient* didapatkan torsi *cycloid magnetic gear* dengan selisih nilai yang sedikit yaitu 0,12291 N.m. Sehingga hasil simulasi dapat dinyatakan sama dan metode simulasi sudah berhasil. Namun penulis meyakini bahwa hasil simulasi *transient* belum akurat karena dalam simulasi *transient* tidak terdapat uji konvergensi dan kualitas *meshing* yang dipakai masih sangat rendah. Sehingga penulis melakukan simulasi *magnetostatic* dengan mengatur sudut *inner gear* yang didapat dari simulasi *transient* sebelumnya. Dari simulasi *magnetostatic*, didapatkan torsi yang memiliki selisih nilai 0,442 N.m dari torsi hasil simulasi *transient*. Akibat timbul perbedaan nilai tersebut, maka penulis melakukan simulasi *transient* dan *magnetostatic* dalam penelitian ini agar torsi yang didapat lebih akurat.

Simulasi dilakukan dengan tahapan yang sistematis agar mendapatkan hasil simulasi yang valid. Adapun tahapan perancangan simulasi yang sudah diverifikasi dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut :

1. Pembuatan desain 3D *cycloid magnetic gear*

Dalam penelitian ini, desain 3D merupakan komponen penting karena penelitian menggunakan *software* berbasis metode elemen hingga. Visualisasi *cycloid magnetic gear* yang digambar dengan menggunakan *software* Solidwork ditunjukkan pada Gambar 3.3. Komponen penyusun *cycloid magnetic gear* terdiri dari poros input, *cycloidal disc*, poros output, dan magnet permanen sebagai gigi magnetik untuk *inner* dan *outer gear*.

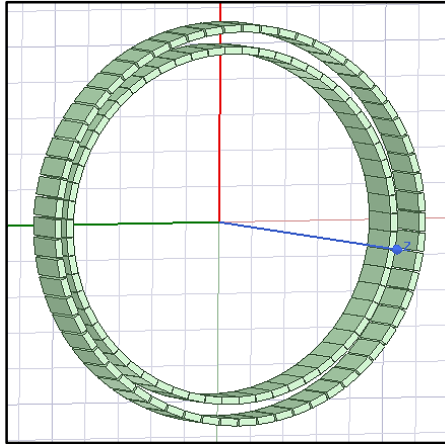


Gambar 3.2 Visualiasi *Cycloid Magnetic Gear*

Dari visualisasi *magnetic cycloid gear* pada Gambar 3.3 di atas, yang dilakukan analisis dalam penelitian ini hanya pada bagian magnet permanen untuk *inner gear* dan *outer gear*. Komponen penyusun lain seperti poros input, *cycloidal disc*, dan poros output tidak disertakan dalam simulasi karena tidak berpengaruh terhadap induksi magnetik dari magnet permanen. Penyebab transmisi torsi pada *magnetic gear* yaitu adanya gaya magnet yang terbentuk dari induksi magnetik dari magnet permanen. Sehingga simulasi cukup dilakukan hanya pada magnet permanen untuk *inner gear* dan *outer gear*.

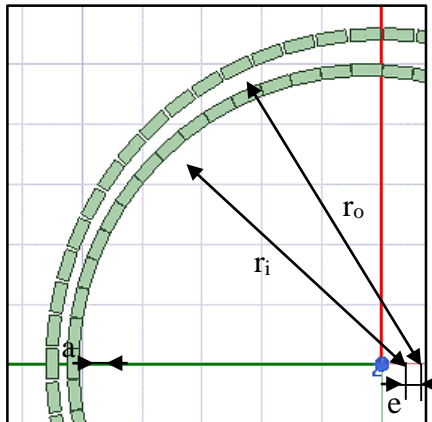
Pembuatan desain tiga dimensi dari *cycloid magnetic gear* dilakukan dengan menggunakan *modeler* yang terdapat di dalam *software* Ansys Maxwell 3D. *Modeler* ini memiliki *user interface* yang bagus dengan *tools* yang tertata dengan baik sehingga sangat memudahkan bagi pemula yang akan melakukan pendesainan. *Tools* yang disediakan terbilang sederhana dibandingkan dengan *software* pemodelan lain yang sangat beragam menu pemodelannya. Namun *modeler* ini susah digunakan untuk membuat desain tiga dimensi yang kompleks. Karena objek simulasi dalam penelitian ini hanya sebatas magnet permanen berbentuk balok lurus, maka *tools* yang ada

pada *modeler* ini sudah mencukupi dalam pembuatan desain. Desain *cycloid magnetic gear* untuk penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.4.



Gambar 3.3 Desain *Cycloid Magnetic Gear*

Parameter dimensi *cycloid magnetic gear* diberi simbol dan ditunjukkan pada Gambar 3.5. Kemudian definisi dari simbol masing-masing parameter tersebut dijelaskan pada Tabel 3.3.



Gambar 3.4 Parameter Dimensi *Cycloid Magnetic Gear*

Tabel 3.3 Parameter Dimensi *Cyloid Magnetic Gear*

Parameter	Definisi	Satuan
a	Jarak antara <i>inner gear</i> dan <i>outer gear</i> (<i>airgap</i>)	mm
r_i	Jarak titik pusat <i>gearbox</i> ke pusat <i>inner gear</i>	mm
r_o	Jarak titik pusat <i>gearbox</i> ke pusat <i>outer gear</i>	mm
e	Jarak eksentrik poros input	mm

Pemberian variasi ukuran parameter dari desain *cyloid magnetic gear* dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya pada torsi *cyloid magnetic gear* untuk kemudian dilakukan analisis dan pembahasan. Adapun variabel dan variasi yang dilakukan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Variabel dan Variasi Penelitian

Variabel	Variasi	Satuan
<i>Airgap</i> (a)	0,2, 1, 2 dan 3	mm
Jarak eksentrik poros input (e)	1, 2, 3, 4 dan 5	mm

Airgap dan jarak eksentrik poros input perlu divariasikan dan diteliti karena sedikit pergeseran dari peletakannya sangat berpengaruh terhadap gaya magnet yang dihasilkan magnet permanen. Jika arah gaya magnetnya tepat, maka kekuatan induksi magnetik akan lebih besar sehingga torsi yang dihasilkan menjadi tinggi.

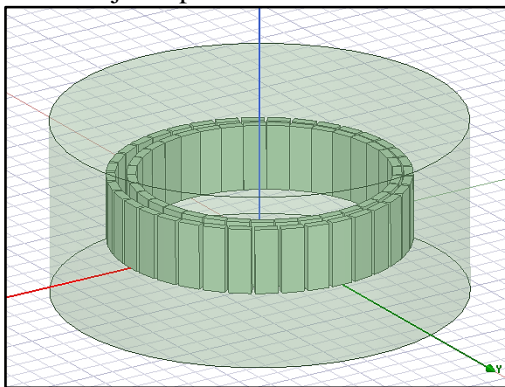
Pemberian variasi *airgap* dan jarak eksentrik poros input menjadikan dimensi *cycloid magnetic gear* berubah-ubah. Ukuran tiap parameter dimensi desain *cycloid magnetic gear* disajikan pada Tabel 3.5.

Tabel 3.5 Dimensi *Cycloid Magnetic Gear*

Dimensi	Air gap	Jarak Eksentrik Poros Input				
		1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
r_i (mm)	0,2	98	98	98	98	98
r_o (mm)	mm	103,325	104,325	105,325	106,325	107,325
r_i (mm)	1	98	98	98	98	98
r_o (mm)	mm	104,125	105,125	106,125	107,125	108,125
r_i (mm)	2	98	98	98	98	98
r_o (mm)	mm	105,125	106,125	107,125	104,125	109,125
r_i (mm)	3	98	98	98	98	98
r_o (mm)	mm	106,125	107,125	108,125	109,125	110,125

2. Pembuatan region simulasi

Region simulasi perlu dibuat untuk membatasi area kalkulasi. Besarnya volume region simulasi direkomendasikan lebih kurang 150% - 200% dari volume objek simulasi. Penulis menentukan region simulasi berbentuk silinder dengan ukuran 200% dari jari-jari luar *outer gear*. Visualisasi region simulasi ditunjukkan pada Gambar 3.6. Dimensi region simulasi masing-masing variasi disajikan pada Tabel 3.6.

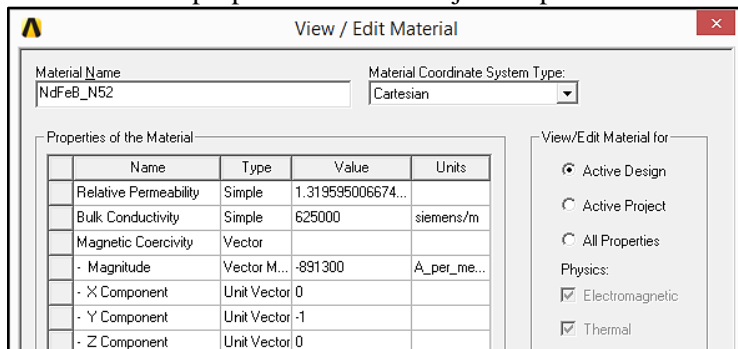
**Gambar 3.5** Region Simulasi

Tabel 3.6 Dimensi Region Simulasi

Dimensi	Air gap	Jarak Eksentrik Poros Input				
		1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
Jari-jari region simulasi (mm)	0,2 mm	210,887	212,885	214,883	216,881	218,878
	1 mm	212,250	214,483	216,481	218,479	220,477
	2 mm	214,483	216,481	218,479	220,477	222,475
	3 mm	216,481	218,479	220,477	222,475	224,473

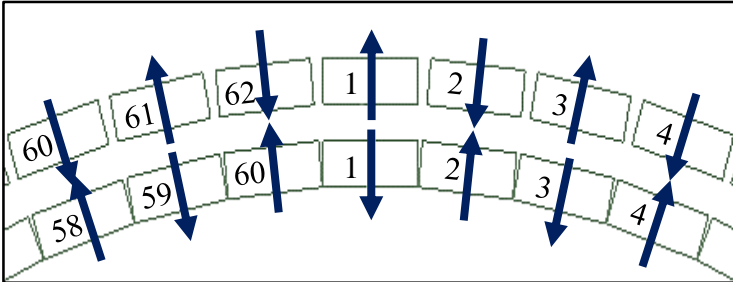
3. Pendefinisian properti material dan penentuan arah magnetisasi magnet permanen

Material yang digunakan untuk magnet permanen yaitu NdFeB N52. Properti magnet NdFeB 52 berupa *relative permeability* dan *coercivity* dimasukkan secara mandiri ke dalam daftar material dengan properti magnet yang disajikan pada Tabel 3.1. Sedangkan region simulasi didefinisikan sebagai udara yang berarti objek penelitian berada di dalam suatu ruang udara ketika beroperasi. Tampilan menu untuk mendefinisikan properti material ditunjukkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 Pendefinisian Properti Material dan Arah Magnetisasi

Arah magnetisasi ditentukan pada setiap magnet permanen dengan arah yang berbeda. Penulis magnet permanen yang berdekatan memiliki arah magnetisasi berlawanan arah agar. Hal ini karena konfigurasi seperti ini memiliki induksi magnetik yang lebih kuat dibandingkan arah magnetisasi yang searah. Visualisasi arah magnetisasi setiap magnet permanen pada *inner gear* dan *outer gear* ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.7 Arah Magnetisasi Magnet Permanen

Pengaturan arah magnetisasi magnet permanen dilakukan pada menu yang ditunjukkan pada Gambar 3.7 dengan memasukkan vektor komponen sumbu X dan sumbu Y. Vektor komponen sumbu X diperoleh dari *cosinus* sudut arah magnetisasi. Sedangkan vektor komponen sumbu Y diperoleh dari *sinus* sudut arah magnetisasi. Nilai vektor komponen sumbu X dan vektor komponen sumbu Y masing-masing magnet permanen pada *inner gear* dan *outer gear* disajikan pada Tabel 3.7.

Tabel 3.7 Arah Magnetisasi Magnet Permanen pada *Inner Gear* dan *Outer Gear*

<i>Inner Magnet</i>	Sudut	Vektor Komponen	
		Sumbu X	Sumbu Y
1	270	0	-1
2	84	0,105	0,995
3	258	-0,208	-0,978
4	72	0,309	0,951
5	246	-0,407	-0,914
6	60	0,500	0,866
7	234	-0,588	-0,809
8	48	0,669	0,743
9	222	-0,743	-0,669
10	36	0,809	0,588
11	210	-0,866	-0,500
12	24	0,914	0,407
13	198	-0,951	-0,309
14	12	0,978	0,208
15	186	-0,995	-0,105
16	0	1	0
17	174	-0,995	0,105
18	348	0,978	-0,208
19	162	-0,951	0,309
20	336	0,914	-0,407
21	150	-0,866	0,500
22	324	0,809	-0,588
23	138	-0,743	0,669
24	312	0,669	-0,743

<i>Outer Magnet</i>	Sudut	Vektor Komponen	
		Sumbu X	Sumbu Y
1	90	0	1
2	264,19	-0,101	-0,995
3	78,39	0,201	0,980
4	252,58	-0,299	-0,954
5	66,77	0,394	0,919
6	240,97	-0,485	-0,874
7	55,16	0,571	0,821
8	229,35	-0,651	-0,759
9	43,55	0,725	0,689
10	217,74	-0,791	-0,612
11	31,94	0,849	0,529
12	206,13	-0,898	-0,440
13	20,32	0,938	0,347
14	194,52	-0,968	-0,251
15	8,71	0,988	0,151
16	182,90	-0,999	-0,051
17	357,10	0,999	-0,051
18	171,29	-0,988	0,151
19	345,48	0,968	-0,251
20	159,68	-0,938	0,347
21	333,87	0,898	-0,440
22	148,06	-0,849	0,529
23	322,26	0,791	-0,612
24	136,45	-0,725	0,689

25	126	-0,588	0,809
26	300	0,500	-0,866
27	114	-0,407	0,914
28	288	0,309	-0,951
29	102	-0,208	0,978
30	276	0,105	-0,995
31	90	0,000	1,000
32	264	-0,105	-0,995
33	78	0,208	0,978
34	252	-0,309	-0,951
35	66	0,407	0,914
36	240	-0,500	-0,866
37	54	0,588	0,809
38	228	-0,669	-0,743
39	42	0,743	0,669
40	216	-0,809	-0,588
41	30	0,866	0,500
42	204	-0,914	-0,407
43	18	0,951	0,309
44	192	-0,978	-0,208
45	6	0,995	0,105
46	180	-1	0
47	354	0,995	-0,105
48	168	-0,978	0,208
49	342	0,951	-0,309
50	156	-0,914	0,407
51	330	0,866	-0,500
52	144	-0,809	0,588
53	318	0,743	-0,669

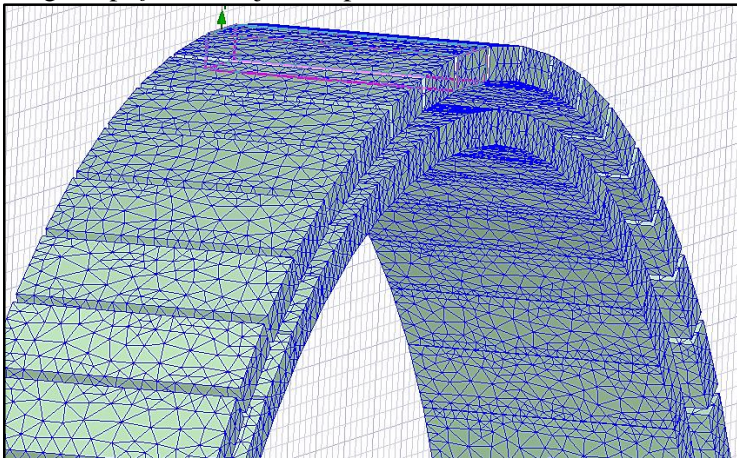
25	310,65	0,651	-0,759
26	124,84	-0,571	0,821
27	299,03	0,485	-0,874
28	113,23	-0,394	0,919
29	287,42	0,299	-0,954
30	101,61	-0,201	0,980
31	275,81	0,101	-0,995
32	90,00	0	1
33	264,19	-0,101	-0,995
34	78,39	0,201	0,980
35	252,58	-0,299	-0,954
36	66,77	0,394	0,919
37	240,97	-0,485	-0,874
38	55,16	0,571	0,821
39	229,35	-0,651	-0,759
40	43,55	0,725	0,689
41	217,74	-0,791	-0,612
42	31,94	0,849	0,529
43	206,13	-0,898	-0,440
44	20,32	0,938	0,347
45	194,52	-0,968	-0,251
46	8,71	0,988	0,151
47	182,90	-0,999	-0,051
48	357,10	0,999	-0,051
49	171,29	-0,988	0,151
50	345,48	0,968	-0,251
51	159,68	-0,938	0,347
52	333,87	0,898	-0,440
53	148,06	-0,849	0,529

54	132	-0,669	0,743
55	306	0,588	-0,809
56	120	-0,500	0,866
57	294	0,407	-0,914
58	108	-0,309	0,951
59	282	0,208	-0,978
60	96	-0,105	0,995

54	322,26	0,791	-0,612
55	136,45	-0,725	0,689
56	310,65	0,651	-0,759
57	124,84	-0,571	0,821
58	299,03	0,485	-0,874
59	113,23	-0,394	0,919
60	287,42	0,299	-0,954
61	101,61	-0,201	0,980
62	275,81	0,101	-0,995

4. Meshing

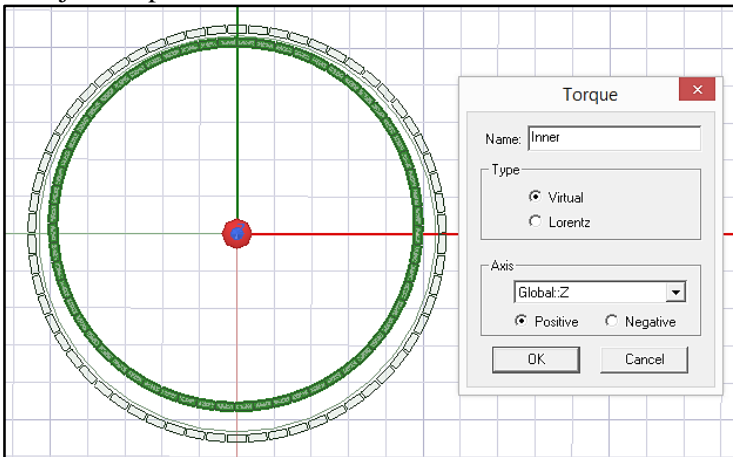
Keakuratan solusi tergantung pada ukuran elemen *meshing*. Untuk menghasilkan solusi yang akurat, ukuran elemen *meshing* umumnya dibuat cukup kecil agar semakin banyak elemen yang dikalkulasi. Sehingga distribusi induksi magnetik yang dihitung pada magnet permanen lebih akurat. Metode *meshing* yang dipakai dalam penelitian ini yaitu *surface approximation* dengan tipe *fine*. Tampilan hasil *meshing* dengan tipe *fine* ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.8 Meshing dengan Tipe Fine

5. Penentuan parameter yang dianalisis

Dalam penelitian ini, nilai yang ingin dicari yaitu torsi yang dihasilkan oleh *inner gear*. Torsi pada *inner gear* berperan sebagai torsi output *cycloid magnetic gear*. Maka perlu dimasukkan parameter torsi *inner gear* ke dalam menu parameter agar setelah simulasi selesai dapat dibaca torsi yang dihasilkan. Menu untuk menentukan parameter torsi *inner gear* ditunjukkan pada Gambar 3.11.



Gambar 3.9 Penentuan Parameter Torsi

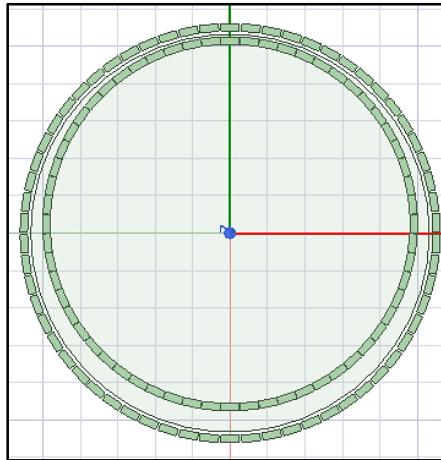
3.3 Simulasi *Transient*

Simulasi pertama yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu simulasi *transient*. Simulasi *transient* pada objek elektromagnetik merupakan simulasi yang melakukan perhitungan medan magnet dalam domain waktu (secara instan pada setiap langkah waktu). Medan magnet dapat berubah terhadap waktu karena adanya pergerakan pada objek yang diteliti baik karena gerakan translasi maupun rotasi. Adapun pengaturan simulasi *transient* yang sudah diverifikasi dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut :

a. Pembuatan *band*

Tujuan dibuat *band* yaitu untuk memberikan gerakan pada objek yang berada di dalamnya. Objek yang berada di

dalam *band* diasumsikan bergerak sebagai kesatuan benda tegar. Dimensi *band* harus sedikit melebihi objek yang berada di dalamnya dan tidak boleh bersentuhan dengan objek lain di luarnya (ANSOFT, 2006). Dalam penelitian ini, penulis menentukan jari-jari *band* merupakan nilai tengah dari jari-jari *inner gear* dan *outer gear*. Visualisasi *band* ditunjukkan pada Gambar 3.12. Dimensi *band* masing-masing variasi disajikan pada Tabel 3.8.



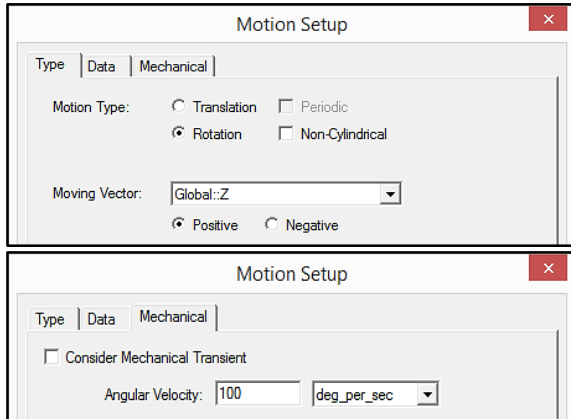
Gambar 3.10 *Band*

Tabel 3.8 Dimensi *Band*

Dimensi	<i>Air gap</i>	Jarak Eksentrik Poros Input				
		1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
Jari-jari <i>band</i> (mm)	0,2 mm	101,225	102,225	103,225	104,225	105,225
	1 mm	101,625	102,625	103,625	104,625	105,625
	2 mm	102,125	103,125	104,125	105,125	106,125
	3 mm	102,625	103,625	104,625	105,625	106,625

b. Pengaturan *motion setup*

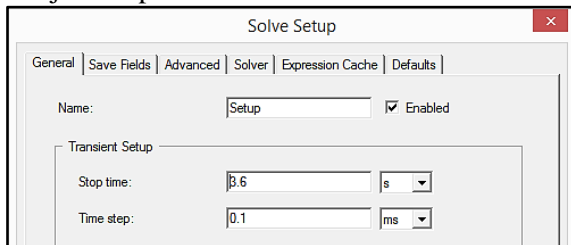
Setelah *band* selesai dibuat, *band* diberikan gerakan dalam menu *motion setup*. Dalam penelitian ini, gerakan yang dipakai yaitu *rotation* dengan *angular velocity* 100 deg/s. Tampilan menu pengaturan motion setup ditunjukkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3.11 Pengaturan *Motion Setup*

c. Pengaturan *transient solve setup*

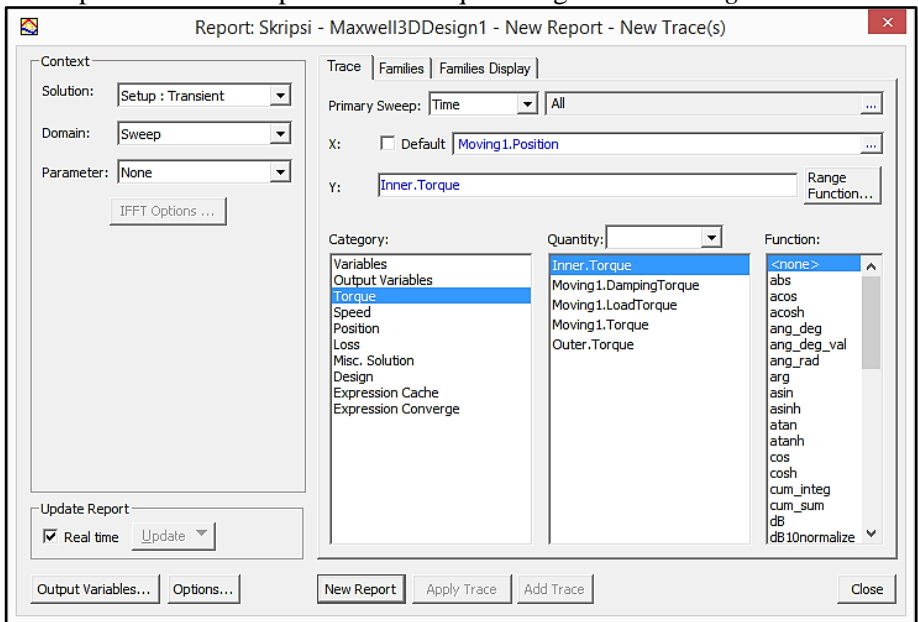
Hasil simulasi yang diinginkan yaitu torsi yang nilainya berubah terhadap sudut putaran *inner gear*. Untuk analisis putaran 360° , diperlukan *stop time* 3,6 s dan *time step* 0,1 ms agar mampu melakukan perhitungan torsi setiap pertambahan putaran *inner gear* $0,01^\circ$. Menu untuk mengatur *transient solve setup* ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.12 Pengaturan *Transient Solve Setup*

d. Pengambilan data hasil simulasi *transient*

Data yang diambil dari simulasi *transient* yaitu grafik sudut putaran *inner gear* terhadap torsi *inner gear*. Menu *plotting* grafik ditampilkan dengan langkah klik menu *Result >> Create Transient Report >> Rectangular Plot*. Kemudian muncul menu *Rectangular Plot of Transient Report* yang ditunjukkan pada Gambar 3.15. Pada sumbu X dipilih *Moving1.Position* sebagai sudut putaran *inner gear*. Sedangkan pada sumbu Y dipilih *Inner.Torque* sebagai torsi *inner gear*.



Gambar 3.13 Menu *Rectangular Plot of Transient Report*

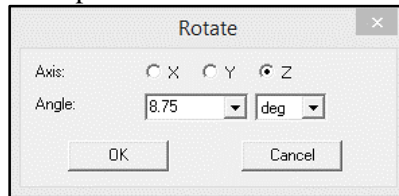
3.4 Simulasi *Magnetostatic*

Simulasi kedua yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu simulasi *magnetostatic*. Perbedaan antara simulasi *magnetostatic* dengan simulasi *transient* yaitu kalkulasi induksi magnetik pada simulasi *magnetostatic* dilakukan pada objek elektromagnetik yang diam sehingga tidak terdapat perubahan induksi magnetik

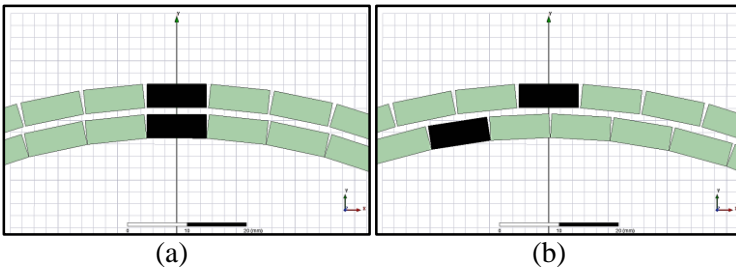
terhadap waktu. Adapun pengaturan simulasi *magnetostatic* dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut :

a. Pengaturan sudut *inner gear*

Inner gear diputar posisinya ke sudut yang menghasilkan torsi terbesar. Sudut tersebut diperoleh dari simulasi *transient* sebelumnya. *Tool* yang digunakan untuk memutar *inner gear* yaitu rotate. Kemudian dimasukkan nilai sudut yang diharapkan. Pengaturan sudut *inner gear* ditunjukkan pada Gambar 3.16. Visualisasi *inner gear* sebelum dan sesudah diputar ditunjukkan pada Gambar 3.17.



Gambar 3.14 Pengaturan Sudut *Inner Gear*

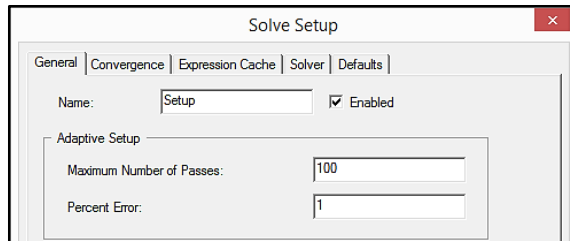


Gambar 3.15 *Inner Gear* (a) Sebelum Diputar, (b) Sesudah Diputar

b. Pengaturan *magnetostatic solve setup*

Pengaturan *magnetostatic solve setup* digunakan untuk mengatur jumlah maksimal iterasi dan tingkat error uji konvergensi hasil simulasi. Tingkat error uji konvergensi hasil simulasi menjadi hal terpenting dalam simulasi *magnetostatic* karena penulis mengharapkan hasil torsi yang dihasilkan lebih akurat dibandingkan dengan hasil torsi dari simulasi *transient*.

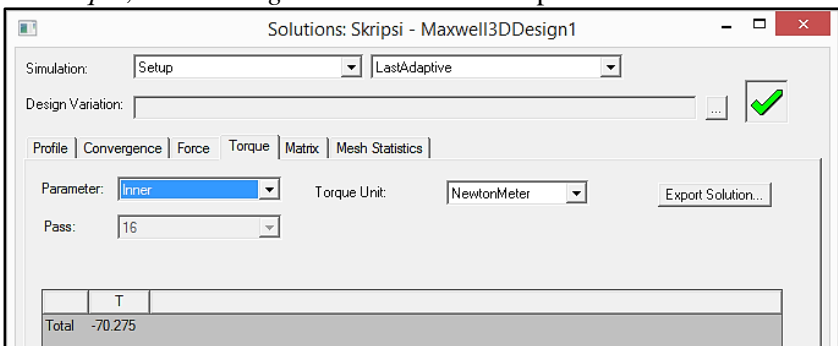
Menu untuk *magnetostatic solve setup* ditunjukkan pada Gambar 3.18.



Gambar 3.16 Pengaturan *Magnetostatic Solve Setup*

c. Pengambilan data hasil simulasi *magnetostatic*

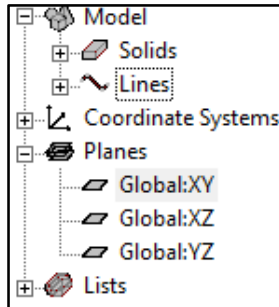
Data yang diambil dari simulasi *magnetostatic* yaitu torsi *inner gear*, grafik B_{total} , B_x , B_y , dan B_z di daerah *airgap* dan kontur induksi magnetik (B). Menu hasil torsi *inner gear* ditampilkan dengan langkah klik menu *Result >> Solution Data*. Kemudian akan muncul menu *Solution Data* yang ditunjukkan pada Gambar 3.19. Pada bagian *Parameter* di tab *Torque*, torsi *inner gear* muncul setelah dipilih *Inner*.



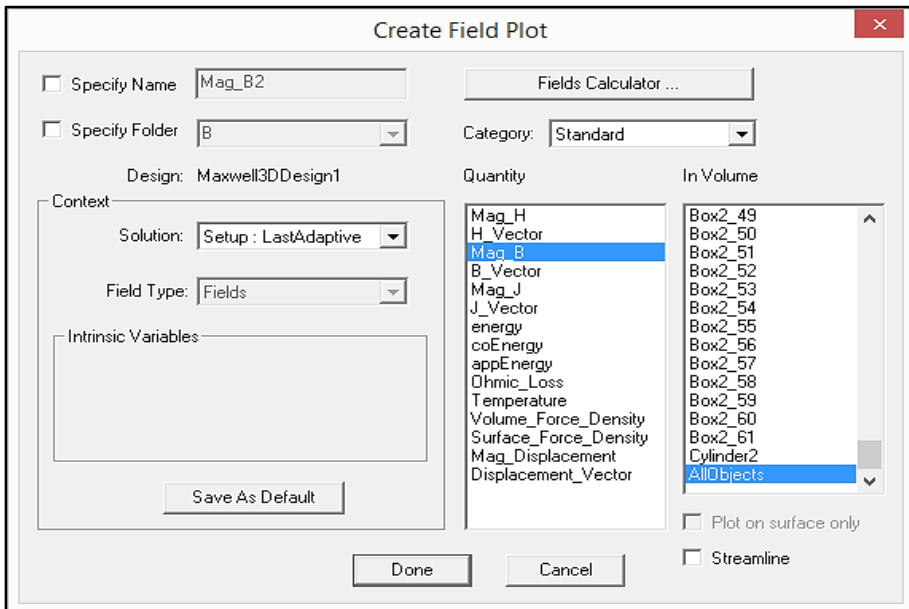
Gambar 3.17 Menu *Solution Data*

Menu *plotting* kontur induksi magnetik (B) di bidang XY ditampilkan dengan memilih *XY Plane* terlebih dahulu. Pemilihan *XY Plane* ditunjukkan pada Gambar 3.22. Kemudian klik *Field Overlays >> Fields >> B >> Mag_B*. Sehingga akan

muncul menu *Field Plot* yang ditunjukkan pada Gambar 3.23. Pada bagian *In Volume* dipilih *All Objects* untuk menampilkan kontur induksi magnetik (B) pada semua bagian objek penelitian baik pada magnet permanen maupun pada region simulasi.

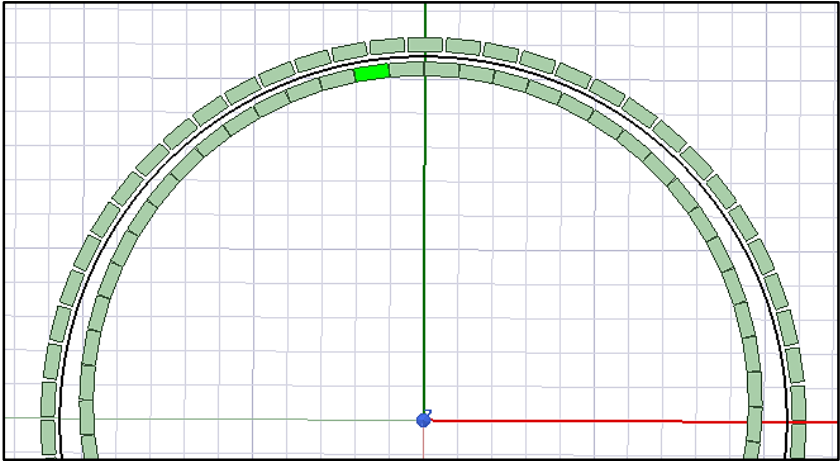


Gambar 3.18 Pemilihan XY Plane



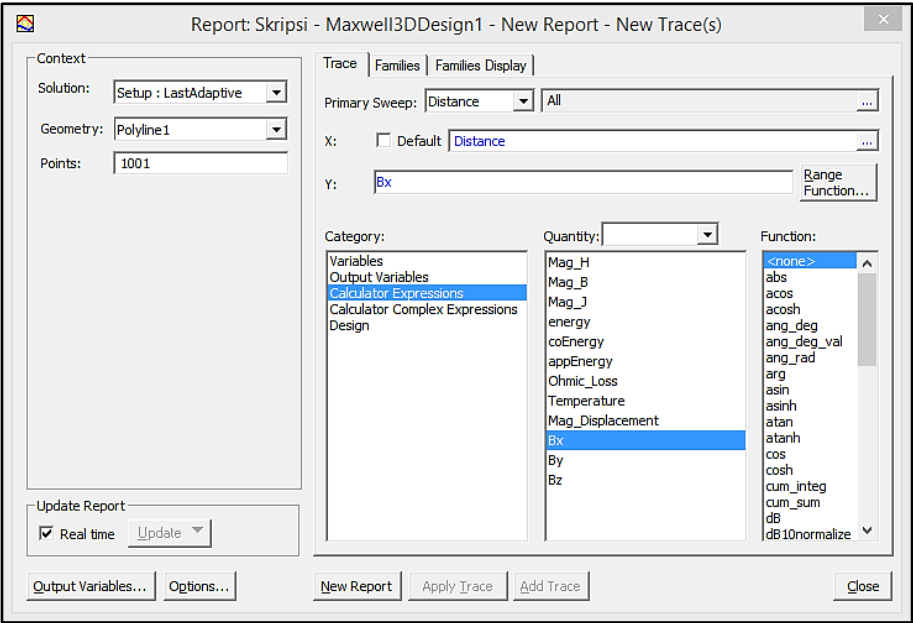
Gambar 3.19 Menu *Field Plot*

Sebelum menampilkan grafik B_{total} , B_x , B_y , dan B_z di daerah *airgap*, terlebih dahulu dibuat lintasan berbentuk lingkaran di daerah *airgap* yang bertujuan untuk menampilkan grafik B_{total} , B_x , B_y , dan B_z di lintasan tersebut. Ukuran lingkaran tersebut sama seperti *band*. Visualisasi lintasan tersebut ditunjukkan pada Gambar 3.19.



Gambar 3.20 Lintasan Grafik B_{total} , B_x , B_y , dan B_z di Daerah *Airgap*

Menu *plotting* grafik B_{total} , B_x , B_y , dan B_z di daerah *airgap* ditampilkan dengan langkah klik *Results >> Create Fields Report >> Rectangular Plot*. Kemudian akan muncul menu *Rectangular Plot of Fields Report* yang ditunjukkan pada Gambar 3.20. Grafik B_{total} , B_x , B_y , dan B_z dimunculkan dengan masing-masing dipilih *Mag_B*, *Bx*, *By*, dan *Bz* di bagian sumbu Y.



Gambar 3.21 Menu *Rectangular Plot of Fields Report*

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini dilakukan analisis data dan pembahasan hasil penelitian yang telah dilakukan. Data hasil penelitian berupa torsi *cycloid magnetic gear* dengan jarak eksentrik poros input dan *airgap* yang divariasikan. Kemudian dianalisis bagaimana pengaruh *airgap* dan jarak eksentrik poros input terhadap torsi. Pembahasan yang terakhir yaitu desain *cycloid magnetic gear* dengan densitas torsi tinggi.

4.1 Data Hasil Penelitian

Dari simulasi *transient* yang telah dilakukan, diperoleh torsi *inner gear cycloid magnetic gear* yang nilainya fluktuatif terhadap sudut putaran *inner gear*. Data hasil simulasi *transient* tersebut disajikan dalam bentuk grafik yang dimuat pada Lampiran A. Dari data hasil simulasi *transient* tersebut, diperoleh sudut putaran yang mampu menghasilkan torsi maksimal yang kemudian disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi *Transient* dan *Magnetostatic*

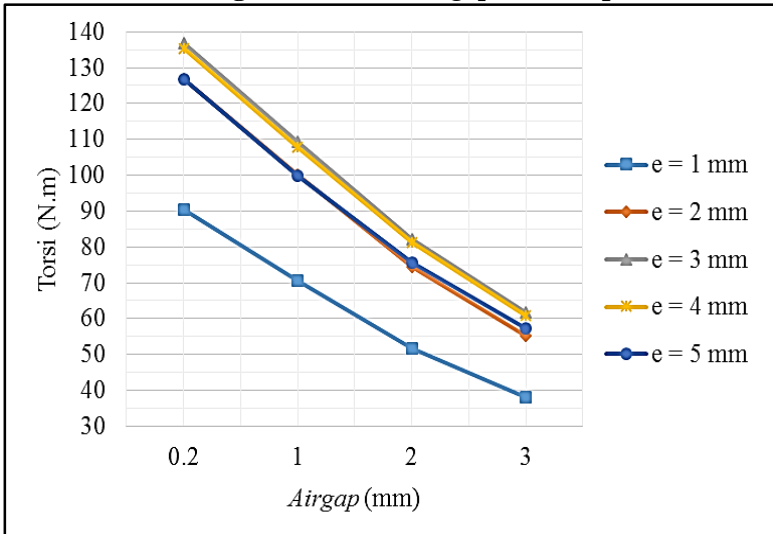
<i>Air gap</i> (mm)	Jarak Eksentrik Poros Input (mm)	Sudut Putaran <i>Inner Gear</i> (°)	Torsi Maksimal (N.m)	
			<i>Transient</i>	<i>Magnetostatic</i>
0,2	1	8,79	97,709	90,352
	2	8,93	139,955	126,830
	3	8,91	152,438	136,930
	4	8,93	152,948	135,260
	5	8,88	137,679	126,770
1	1	8,82	66,952	70,575
	2	8,83	103,688	100,300

1	3	8,80	120,209	109,280
	4	8,79	118,848	107,970
	5	8,61	102,860	99,940
2	1	8,85	51,235	51,817
	2	8,75	82,413	74,507
	3	8,75	86,434	82,025
	4	8,74	86,791	81,250
	5	8,66	77,210	75,734
3	1	8,79	33,086	37,977
	2	8,71	55,760	55,226
	3	8,83	63,402	61,737
	4	8,71	64,838	60,897
	5	8,72	62,524	57,247

Nilai torsi maksimal dari simulasi *transient* di atas belum bisa dijadikan bahan analisis. Hal ini karena pada simulasi *transient* dari *software* ANSYS Maxwell 3D tidak ada uji konvergensi sehingga nilai torsi yang diperoleh belum akurat. Untuk mendapatkan hasil yang akurat, diperlukan simulasi lebih lanjut dengan tipe simulasi yang memiliki uji konvergensi. Simulasi *magnetostatic* dapat dijadikan solusi karena memiliki uji konvergensi dengan tingkat *error* yang dapat diatur.

Oleh karena itu, peneliti melakukan simulasi *magnetostatic* dengan sudut putaran *inner gear* yang diperoleh dari simulasi *transient* sebelumnya dan menentukan tingkat *error* maksimal 1%. Data hasil simulasi *magnetostatic* berupa torsi yang telah konvergen disajikan pada Tabel 4.1.

4.2 Analisis Pengaruh Variasi *Airgap* terhadap Torsi



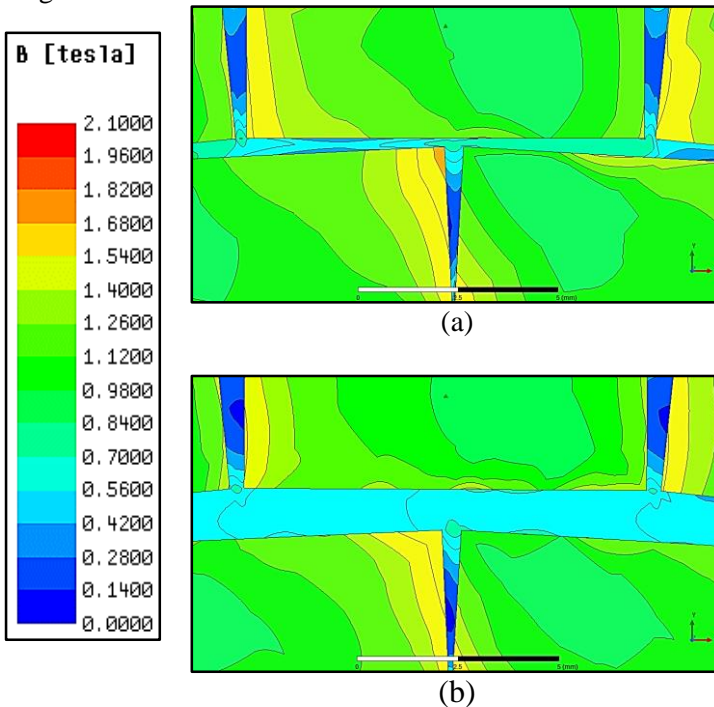
Gambar 4.1 Grafik Pengaruh Variasi *Airgap* terhadap Torsi

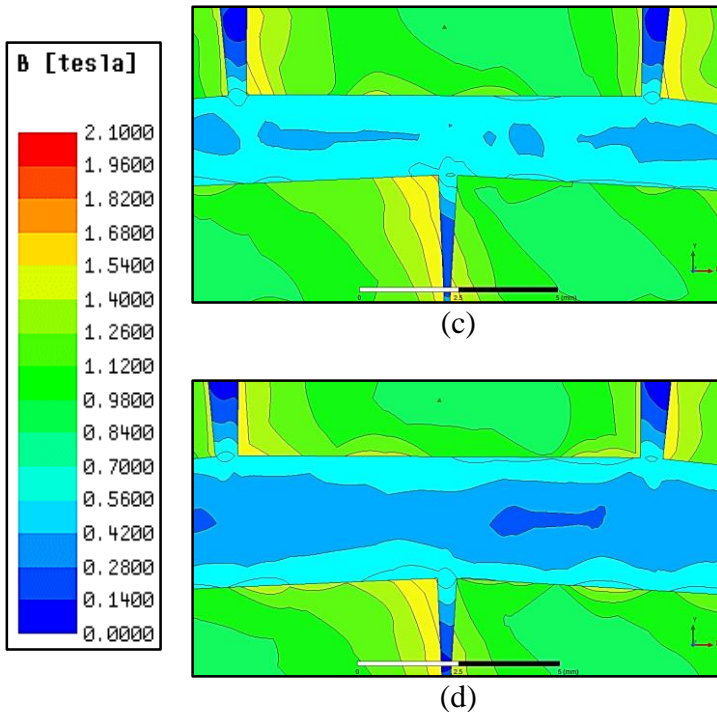
Grafik pada Gambar 4.1 menampilkan bagaimana pengaruh *airgap* yang bervariasi terhadap torsi. Pada *trendline* grafik untuk jarak eksentrik poros input 1 mm, penggunaan *airgap* 0,2 mm memberikan torsi yang paling tinggi. Selanjutnya *trendline* grafik mengalami penurunan pada *airgap* 1 mm, 2 mm, dan 3 mm. Penurunan *trendline* grafik tersebut terlihat mendekati linier. *Trendline* grafik untuk jarak eksentrik poros input 2 mm, 3 mm, 4 mm, dan 5 mm memiliki kemiripan dengan *trendline* grafik untuk jarak eksentrik poros input 1 mm yaitu memiliki torsi paling tinggi pada *airgap* 0,2 mm dan memiliki *trendline* yang mengalami penurunan dengan bertambahnya *airgap*.

Pada Gambar 4.1 terlihat bahwa perubahan *airgap* sangat berpengaruh terhadap torsi. Peningkatan *airgap* dari 0,2 mm ke 1 mm, 1 mm ke 2 mm, dan 2 mm ke 3 mm mampu menurunkan torsi dalam kisaran 20,193% - 26,709% (13,84 N.m - 27,65 N.m). Hal ini mengindikasikan bahwa penentuan *airgap* sangatlah penting

dalam pembuatan *cycloid magnetic gear*. Sehingga dalam pembuatan *cycloid magnetic gear* dibutuhkan peralatan dengan presisi tinggi agar mendapatkan *airgap* sesuai desain. Ketentuan tersebut menjadi hal utama apabila menginginkan *airgap* yang sangat kecil seperti *airgap* 0,2 mm agar mendapatkan torsi yang tinggi.

Torsi pada peralatan magnetik dipengaruhi oleh besarnya induksi magnetik (lihat Persamaan 2.10). Semakin besar induksi magnetik maka semakin besar torsi. Dalam kasus ini, torsi semakin berkurang akibat *airgap* yang bertambah. Sehingga penulis melakukan peninjauan induksi magnetik pada masing-masing *airgap* untuk mengetahui pengaruh *airgap* terhadap induksi magnetik.



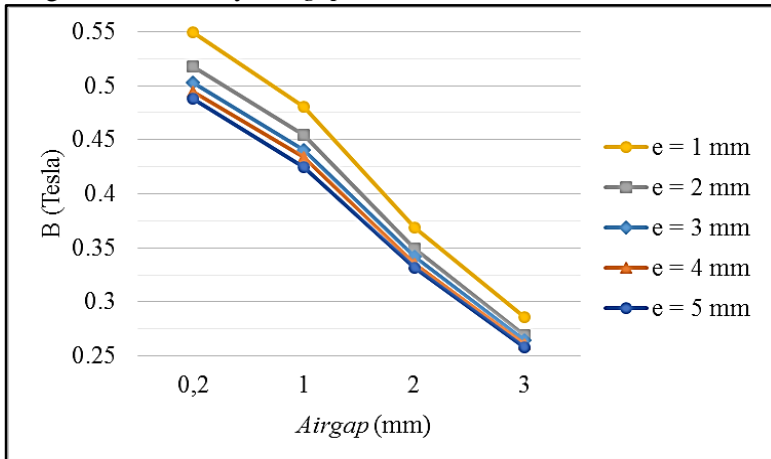


Gambar 4.2 Kontur Induksi Magnetik (B) dengan Jarak Eksentrik Poros Input 1 mm dan *Airgap* yang Bervariasi (a) $a = 0,2$ mm, (b) $a = 1$ mm, (c) $a = 2$ mm, (d) $a = 3$ mm

Kontur induksi magnetik pada *cycloid magnetic gear* dengan jarak eksentrik poros input 1 mm pada masing-masing *airgap* ditunjukkan pada Gambar 4.2. Karena keterbatasan ruang untuk menampilkan gambar, maka kontur induksi magnetik hanya diperlihatkan pada perbesaran gambar *airgap* di posisi 0° .

Pada Gambar 4.2 terlihat bahwa terdapat perbedaan penyebaran gradien warna induksi magnetik magnet di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* yang mengindikasikan terdapat perbedaan nilai induksi magnetik. Induksi magnetik di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* untuk *airgap* 0,2 mm didominasi

warna hijau dan untuk *airgap* 1 mm didominasi warna biru terang. Kemudian untuk *airgap* 2 mm muncul warna kebiruan dan untuk *airgap* 3 mm warna kebiruan mendominasi daerah tersebut. Sehingga induksi magnetik di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* terbesar terjadi pada *airgap* 0,2 mm dan semakin berkurang dengan bertambahnya *airgap*.



Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Variasi *Airgap* terhadap Rata-Rata Induksi Magnetik ($B_{\text{total, rata-rata}}$) di Daerah *Airgap*

Grafik pada Gambar 4.3 merupakan nilai rata-rata dari induksi magnetik di daerah *airgap*. Grafik tersebut dapat menyajikan nilai rata-rata dari induksi magnetik di daerah *airgap* secara keseluruhan. Nilai tersebut ini perlu disajikan karena pada Gambar 4.2 hanya menyajikan induksi magnetik di perbesaran gambar *airgap* di posisi 0° .

Pada Gambar 4.3 terlihat bahwa bertambahnya *airgap* mengakibatkan turunnya rata-rata induksi magnetik di daerah *airgap*. Penurunan *trendline* yang terbentuk memiliki gradien yang mirip pada masing-masing jarak eksentrik poros input. Peningkatan *airgap* dari 0,2 mm ke 1 mm, 1 mm ke 2 mm, dan 2 mm ke 3 mm mampu menurunkan rata-rata induksi magnetik di

daerah *airgap* dalam kisaran 12,275% - 23,247% (0,06184 - 0,11167 T).

Pengaruh jarak antara dua magnet permanen terhadap induksi magnetik dijelaskan melalui hubungan Persamaan 2.10 dengan Persamaan 2.21 yang disubstitusikan sehingga didapatkan persamaan sebagai berikut.

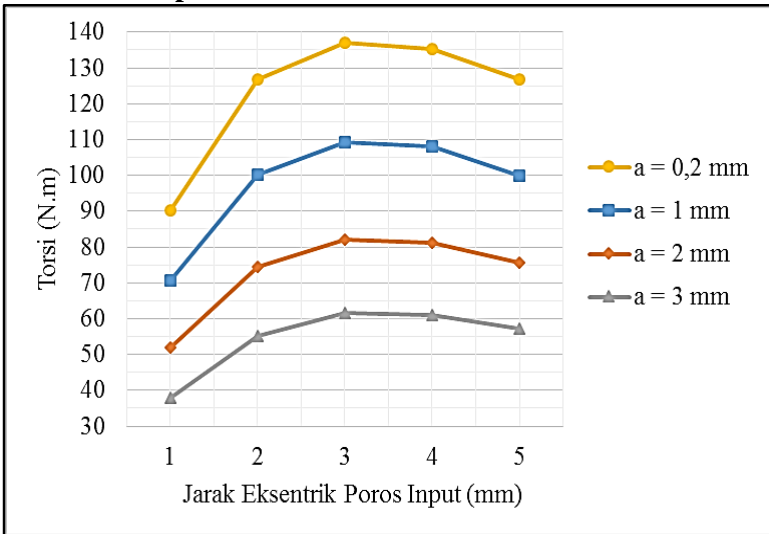
$$\frac{\mu_0}{4\pi} \frac{p_1 p_2}{r^2} = \int (J \times B) dv \quad (4.1)$$

dengan μ_0 = permeabilitas udara hampa = $4\pi \times 10^{-7}$ (Wb/A.m)
 p_1 = kekuatan kutub magnet permanen 1 (A.m)
 p_2 = kekuatan kutub magnet permanen 2 (A.m)
 r = jarak antara magnet permanen 1 dan 2 (m)
 J = *current density* (A/m²)
 B = induksi magnetik (Wb/m² atau T)

Dari Persamaan 4.1 di atas, dapat diketahui bahwa kuadrat jarak antara dua magnet permanen berbanding terbalik dengan induksi magnetik. Sehingga semakin besar jarak antara dua magnet permanen maka semakin kecil induksi magnetik. Persamaan tersebut dapat menjelaskan bahwa semakin besar *airgap* maka jarak antara *inner gear* dan *outer gear* semakin besar, sehingga induksi magnetik di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* semakin berkurang.

Dapat disimpulkan bahwa dengan jarak eksentrik poros input yang sama, perubahan *airgap* berpengaruh terhadap torsi dimana semakin besar *airgap* maka semakin rendah torsi. Hal ini terjadi karena induksi magnetik di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* semakin berkurang dengan bertambahnya *airgap*. Induksi magnetik yang semakin berkurang mengakibatkan berkurangnya torsi.

4.3 Analisis Pengaruh Variasi Jarak Eksentrik Poros Input terhadap Torsi

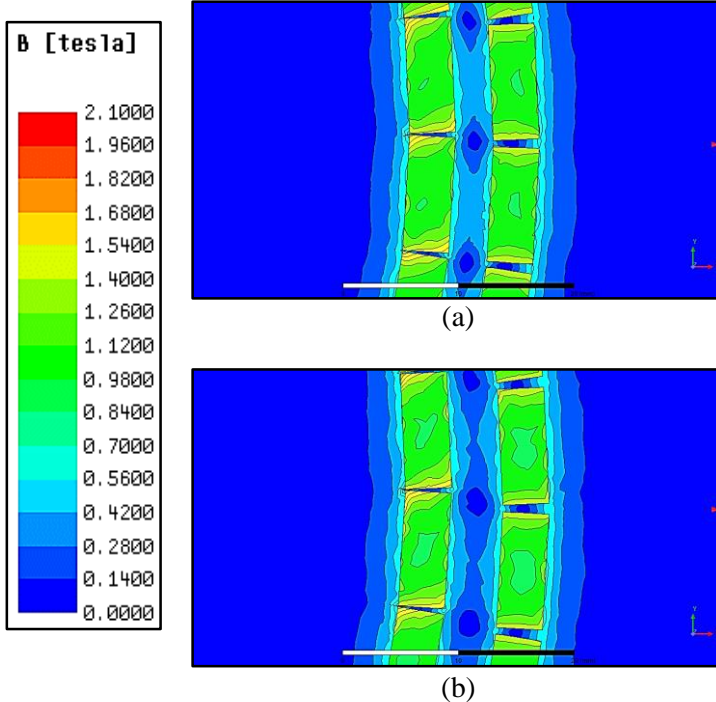


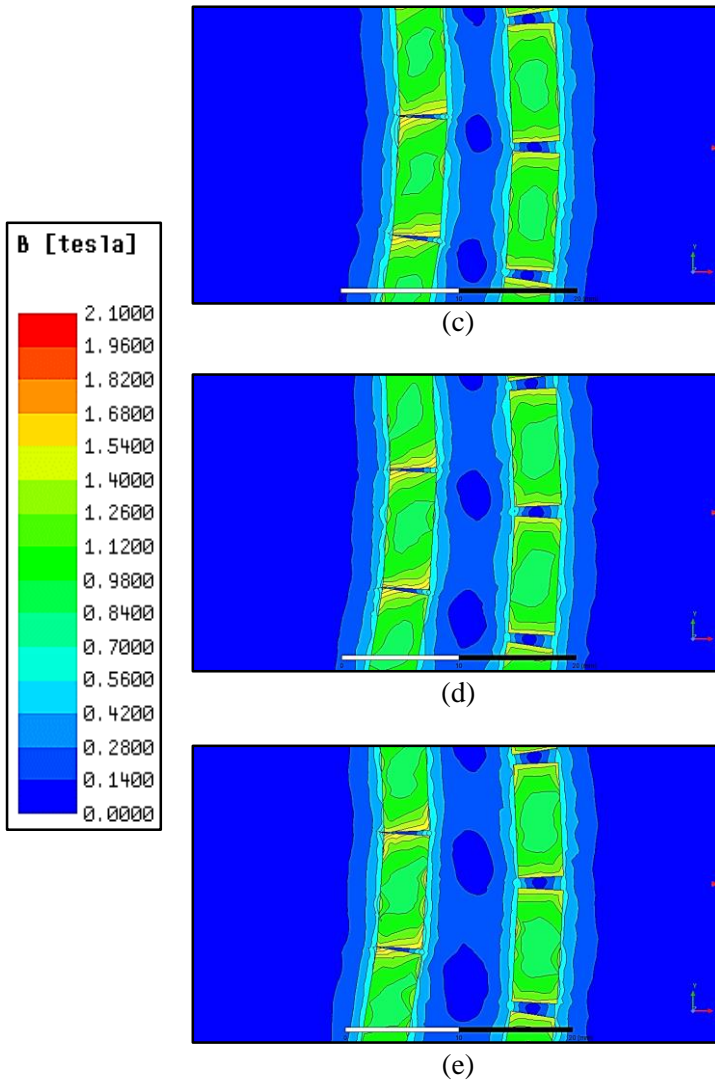
Gambar 4.4 Grafik Pengaruh Variasi Jarak Eksentrik Poros Input terhadap Torsi

Grafik pada Gambar 4.4 menampilkan bagaimana pengaruh jarak eksentrik poros input yang bervariasi terhadap torsi. Pada *trendline* grafik untuk *airgap* 0,2 mm, penggunaan jarak eksentrik poros input 1 mm memberikan torsi output yang paling rendah. Selanjutnya *trendline* grafik mengalami kenaikan pada jarak eksentrik poros input 2 dan 3 mm. Kemudian *trendline* grafik mengalami penurunan pada jarak eksentrik poros input 4 dan 5 mm. Kenaikan dan penurunan *trendline* grafik tersebut terlihat membentuk kurva parabolik. *Trendline* grafik untuk *airgap* 1 mm, 2 mm, dan 3 mm memiliki kemiripan dengan *trendline* grafik untuk *airgap* 1 mm yaitu memiliki torsi output terendah pada jarak eksentrik poros input 1 mm dan bentuk *trendline* yang mengalami peningkatan dengan bertambahnya jarak eksentrik poros input

yang mencapai puncak pada nilai 3 mm, kemudian mengalami penurunan dengan bertambahnya jarak eksentrik poros input.

Pada Gambar 4.4 terlihat bahwa perubahan jarak eksentrik poros input sangat berpengaruh terhadap torsi. Peningkatan jarak eksentrik poros input dari 1 mm ke 2 mm, 2 mm ke 3 mm, 3 mm ke 4 mm, dan 4 mm ke 5 mm sangat berpengaruh terhadap torsi. Perubahan jarak eksentrik poros input tersebut mampu mengubah torsi dalam kisaran 0,945% - 45,420% (0,775 N.m - 36,478 N.m). Hal ini mengindikasikan bahwa penentuan jarak eksentrik poros input sangatlah penting dalam pembuatan *cycloid magnetic gear*, sehingga dalam pembuatannya dibutuhkan peralatan dengan presisi tinggi.





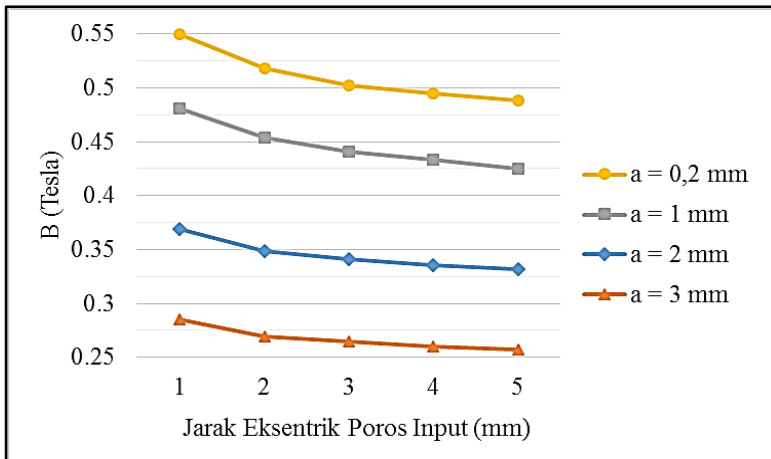
Gambar 4.5 Kontur Induksi Magnetik (B) dengan *Airgap* 2 mm dan Jarak Eksentrik Poros Input yang Bervariasi (a) $e = 1$ mm, (b) $e = 2$ mm, (c) $e = 3$ mm, (d) $e = 4$ mm, (e) $e = 5$ mm

Torsi pada peralatan magnetik dipengaruhi oleh besarnya induksi magnetik (lihat Persamaan 2.10). Semakin besar induksi magnetik maka semakin besar torsi. Dalam kasus ini, torsi mengalami perubahan akibat jarak eksentrik poros input yang bervariasi. Sehingga penulis melakukan peninjauan induksi magnetik pada masing-masing jarak eksentrik poros input untuk mengetahui pengaruhnya terhadap induksi magnetik. Kontur induksi magnetik pada *cycloid magnetic gear* dengan *airgap* 2 mm pada masing-masing jarak eksentrik poros input ditunjukkan pada Gambar 4.5. Karena keterbatasan ruang untuk menampilkan gambar, maka kontur induksi magnetik hanya diperlihatkan pada perbesaran gambar *airgap* di posisi 270° .

Dari Gambar 4.5 terlihat bahwa terdapat perbedaan penyebaran gradien warna induksi magnetik magnet di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* yang mengindikasikan terdapat perbedaan nilai induksi magnetik. Gradien warna induksi magnetik di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* untuk jarak eksentrik poros input 1 mm didominasi warna biru terang dan terdapat sedikit warna biru gelap. Warna biru gelap tersebut mulai berikatan untuk jarak eksentrik poros input 2 mm dan menjadi semakin besar ikatannya untuk jarak eksentrik poros input 3 mm, 4 mm, dan 5 mm. Sehingga nilai induksi magnetik mengalami penurunan dari jarak eksentrik poros input 1 mm hingga 5 mm.

Bertambahnya jarak eksentrik poros input mengakibatkan bertambahnya diameter *outer gear*. Karena diameter *inner gear* tetap maka terjadi perenggangan jarak antara magnet permanen pada *inner gear* dan *outer gear*, kecuali pada *airgap* di posisi 0° .

Hal ini sesuai dengan pembahasan pada sub-bab 4.2 bahwa semakin besar jarak antara dua magnet permanen maka semakin kecil induksi magnetik. Semakin besar jarak eksentrik poros input maka jarak antara *inner gear* dan *outer gear* semakin besar, sehingga induksi magnetik di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* semakin berkurang.



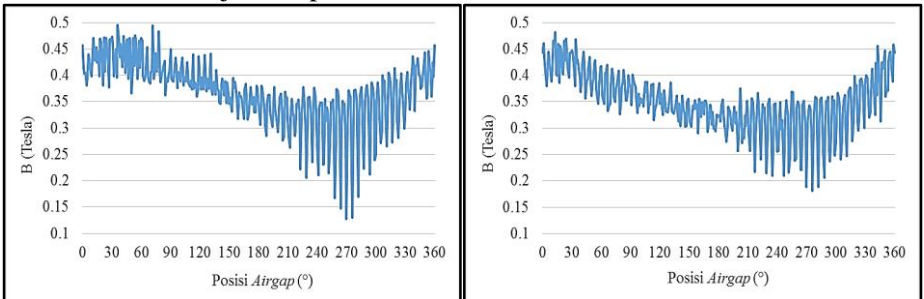
Gambar 4.6 Grafik Pengaruh Variasi Jarak Eksentrik Poros Input terhadap Rata-Rata Induksi Magnetik ($B_{\text{total, rata-rata}}$) di Daerah *Airgap*

Grafik pada Gambar 4.6 merupakan nilai rata-rata dari induksi magnetik di daerah *airgap*. Grafik tersebut dapat menyajikan nilai rata-rata dari induksi magnetik di daerah *airgap* secara keseluruhan. Nilai tersebut ini perlu disajikan karena pada Gambar 4.5 hanya menyajikan induksi magnetik di perbesaran gambar *airgap* di posisi 270° .

Pada Gambar 4.6 terlihat bahwa bertambahnya jarak eksentrik poros input mengakibatkan turunnya rata-rata induksi magnetik di daerah *airgap*. Penurunan *trendline* yang terbentuk memiliki gradien yang mirip pada masing-masing *airgap*. Peningkatan jarak eksentrik poros input dari 1 mm ke 2 mm, 2 mm ke 3 mm, 3 mm ke 4 mm, dan 4 mm ke 5 mm mampu menurunkan rata-rata induksi magnetik di daerah *airgap* dalam kisaran 0,975% - 5,852% (0,00285 - 0,3218 T).

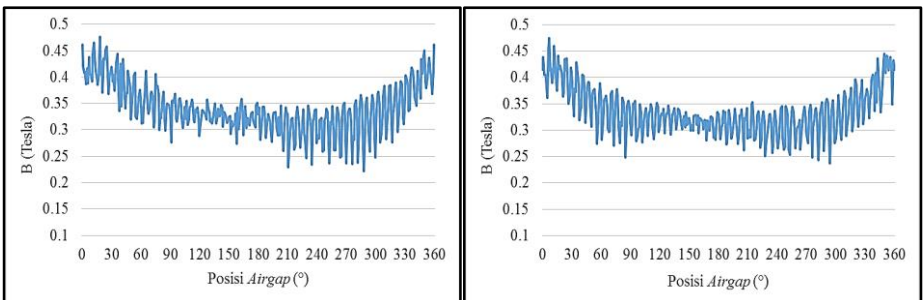
Seharusnya apabila induksi magnetik semakin berkurang maka torsi yang dihasilkan semakin berkurang. Dari penelitian ini didapatkan penurunan torsi pada peningkatan jarak eksentrik poros input dari 3 mm ke 5 mm yang sudah sesuai dengan teori. Namun pada peningkatan jarak eksentrik poros input 1 mm ke 3 mm terjadi peningkatan torsi yang tidak sesuai teori.

Oleh karena itu, penulis melakukan peninjauan grafik induksi magnetik (B_{total}) di daerah *airgap* untuk mengetahui keganjilan pada induksi magnetik. Grafik induksi magnetik (B_{total}) di daerah *airgap* dengan *airgap* 2 mm dan jarak eksentrik yang bervariasi ditunjukkan pada Gambar 4.7.



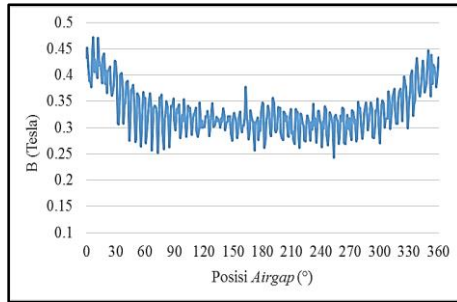
(a)

(b)



(c)

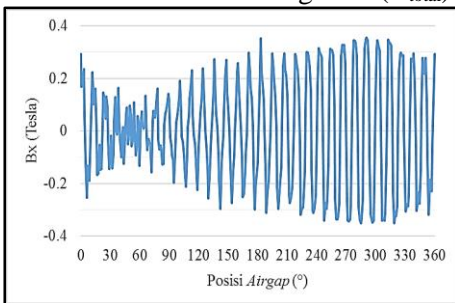
(d)



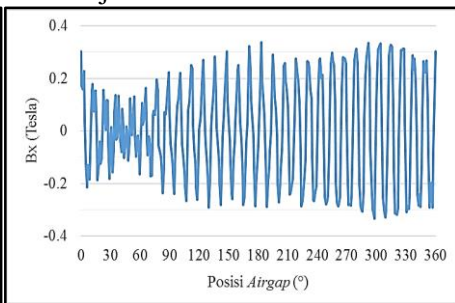
(e)

Gambar 4.7 Grafik Induksi Magnetik (B_{total}) di Daerah *Airgap* dengan *Airgap* 2 mm dan Jarak Eksentrik Poros Input yang Bervariasi (a) $e = 1$ mm, (b) $e = 2$ mm, (c) $e = 3$ mm, (d) $e = 4$ mm, (e) $e = 5$ mm

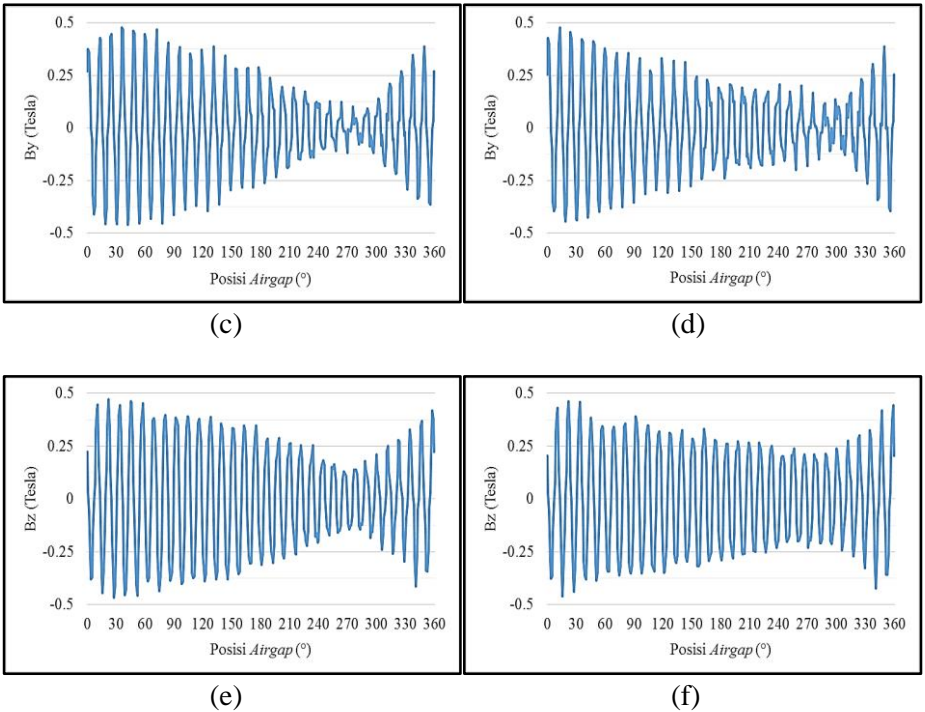
Pada Gambar 4.7 (a) terlihat bahwa terdapat penurunan induksi magnetik (B_{total}) secara tajam di posisi *airgap* 270° . Berkurangnya induksi magnetik (B_{total}) pada jarak eksentrik poros input 1 mm menyebabkan torsi yang dihasilkan tidak optimal. Penurunan nilai secara tajam tersebut mulai berkurang seiring penambahan jarak eksentrik poros input, sehingga pada jarak eksentrik poros input 2 mm dan 3 mm terjadi kenaikan torsi. Peninjauan lebih lanjut dilakukan pada induksi magnetik B_x , B_y , dan B_z di daerah *airgap* untuk mengetahui penyebab penurunan nilai induksi magnetik (B_{total}) secara tajam di atas.



(a)

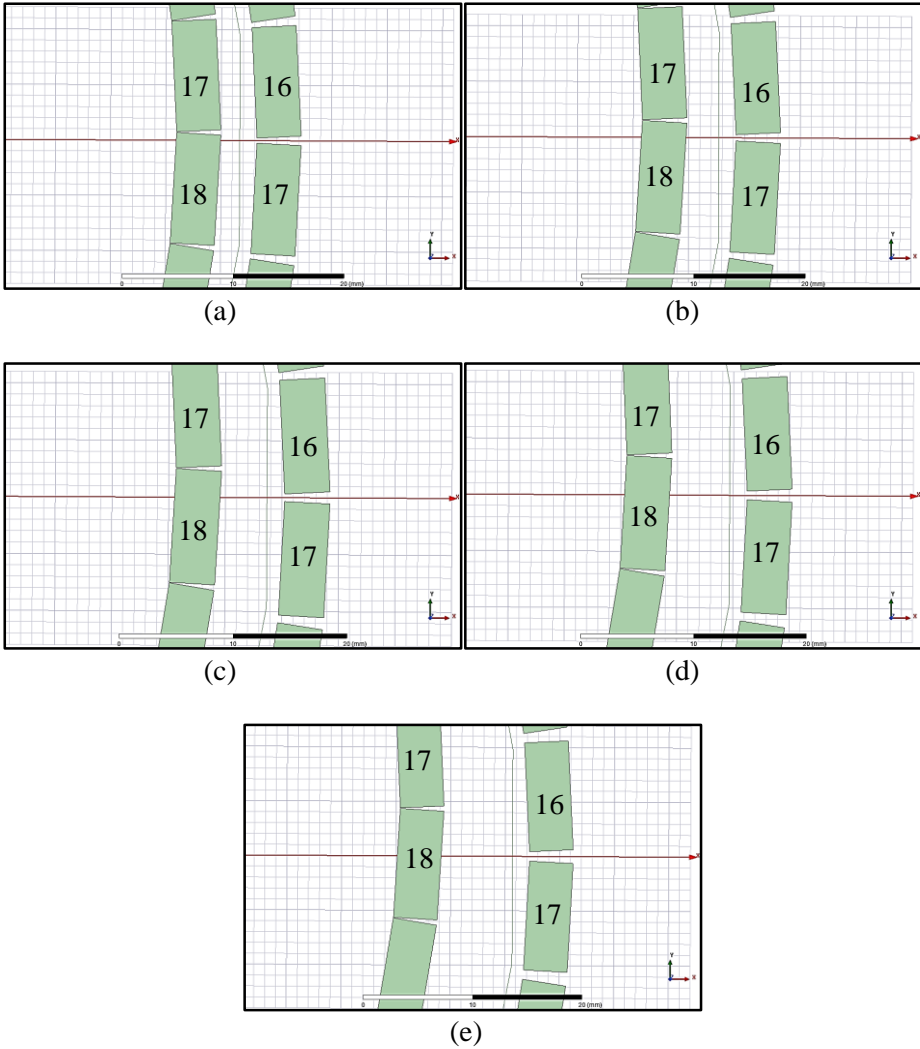


(b)



Gambar 4.8 Grafik Induksi Magnetik (B) di Daerah *Airgap* dengan *Airgap* 2 mm dan Jarak Eksentrik Poros Input yang Bervariasi (a) B_x untuk $e = 1$ mm, (b) B_x untuk $e = 2$ mm, (c) B_y untuk $e = 1$ mm, (d) B_y untuk $e = 2$ mm, (e) B_z untuk $e = 1$ mm, (f) B_z untuk $e = 2$ mm

Gambar 4.8 merupakan perbandingan induksi magnetik di daerah *airgap* dari segi B_x , B_y , dan B_z untuk jarak eksentrik poros input 1 mm dan 2 mm. Dari gambar tersebut terlihat bahwa di posisi *airgap* 270° terjadi penurunan B_x , peningkatan B_y , dan peningkatan B_z dari jarak eksentrik poros input 1 mm ke 2 mm. Penurunan B_y dan B_z di posisi *airgap* 270° untuk jarak eksentrik poros input 1 mm menjadi penyebab terjadinya penurunan nilai induksi magnetik (B_{total}) secara tajam.



Gambar 4.9 Perbesaran Desain *Cycloid Magnetic Gear* di Daerah Airgap 270°

Penyebab penurunan B_y dan B_z di posisi *airgap* 270° untuk jarak eksentrik poros input 1 mm ditinjau melalui perbesaran desain *cycloid magnetic gear* yang ditunjukkan pada Gambar 4.9. Pada Gambar 4.9 (a) terlihat bahwa posisi magnet permanen 17 dan 18 pada *inner gear* berhadapan hampir simetris terhadap magnet permanen 16 dan 17 pada *outer gear*. Posisi simetris tentunya menyebabkan induksi magnetik hanya terjadi pada arah sumbu X. Hal ini menyebabkan pada jarak eksentrik poros input 1 mm di posisi *airgap* 270° terjadi peningkatan B_x , penurunan B_y , dan penurunan B_z . Sehingga resultan induksi magnetik (B_{total}) menjadi berkurang dan mengakibatkan torsi yang dihasilkan tidak optimal.

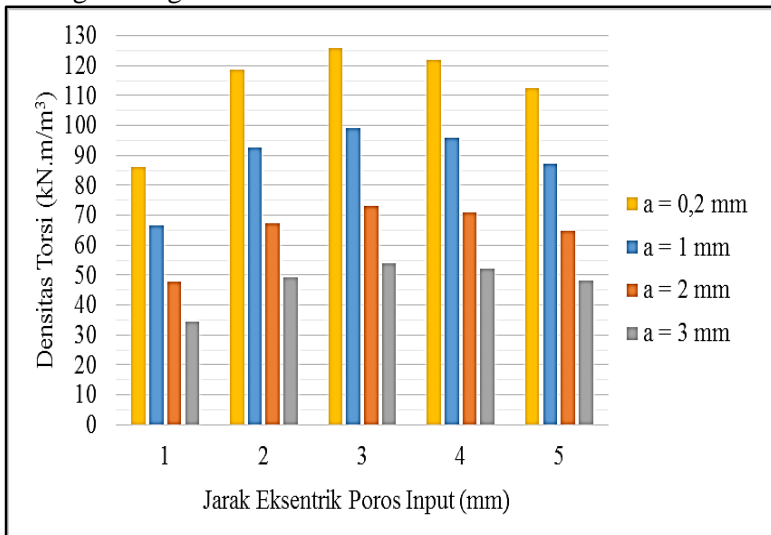
Dapat disimpulkan bahwa dengan *airgap* yang sama, perubahan jarak eksentrik poros input mampu memberikan perubahan terhadap torsi output. Dengan diameter *inner gear* yang sama, apabila semakin besar jarak eksentrik poros input maka diameter *outer gear* menjadi semakin bertambah dan perenggangan *inner gear* dan *outer gear* menjadi semakin bertambah, sehingga induksi magnetik di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* menjadi semakin berkurang dan torsi yang dihasilkan menjadi turun. Namun pada penelitian ini, pada jarak eksentrik poros input 1 mm dan 2 mm tidak dihasilkan torsi yang tinggi karena pertemuan antar magnet permanen pada *inner gear* dan *outer gear* di posisi *airgap* 270° berhadapan hampir simetris yang mengakibatkan induksi magnetik didominasi pada arah sumbu X, sedangkan pada arah sumbu Y dan Z induksi magnetik yang dihasilkan sedikit, sehingga resultan induksi magnetik melemah dan torsi menjadi turun.

Oleh karena itu, sebelum menentukan jarak eksentrik poros input dalam pembuatan *cycloid magnetic gear* diperlukan analisis terlebih dahulu mengenai pengaruhnya terhadap torsi output.

4.4 Desain *Cycloid Magentic Gear* yang Memiliki Densitas Torsi Tinggi

Kelemahan *magnetic gear* dari penelitian terdahulu yaitu densitas torsi yang dihasilkan masih rendah. Densitas torsi merupakan besaran torsi yang dihasilkan tiap satuan volume. Pada saat tersebut, torsi yang dihasilkan lebih rendah dari torsi *mechanical gear* dengan volume *gearbox* yang sama. Seiring dengan perkembangannya, *magnetic gear* belum banyak diminati penggunaannya dikarenakan faktor tersebut. Sehingga densitas torsi selalu menjadi fokus penelitian terpenting yang terus ditingkatkan agar mampu bersaing dengan densitas torsi *mechanical gear*.

Oleh karena itu, penulis juga menganalisis mengenai densitas torsi. Berikut merupakan grafik densitas torsi untuk masing-masing variasi.



Gambar 4.5 Grafik Densitas Torsi

Dari grafik densitas torsi pada gambar 4.5, dapat dilihat bahwa densitas torsi paling tinggi yaitu 125,923 kN.m/m³.

Densitas torsi tersebut didapatkan dengan menggunakan *airgap* 0,2 mm dan jarak eksentrik poros input 3 mm. Sebagaimana penjelasan pada sub-bab 4.2 dan 4.3, hal ini mampu diperoleh karena di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* memiliki induksi magnetik yang tinggi dibandingkan dengan desain yang lain. Torsi sendiri dipengaruhi oleh induksi magnetik, semakin besar induksi magnetik maka semakin besar torsi.

Tabel 4.2 Perbandingan *Cycloid Magnetic Gear* dan *Cycloid Mechanical Gear*
(Interjaya, 2014)

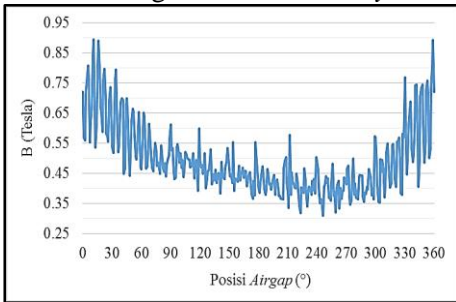
Pembanding	<i>Cycloid Gear</i>		Satuan
	<i>Magnetic</i>	<i>Mechanical</i>	
Gigi <i>inner gear</i>	60	30	-
Gigi <i>outer gear</i>	62	31	-
Torsi Maksimal	136,93	500	N.m
Diameter <i>Outer Gear</i>	107,441	204	mm
Tebal <i>Outer Gear</i>	30	34,5	mm
Volume <i>Outer Gear</i>	0,00109	0,001127	m ³
Densitas torsi	125,923	443,63	kN.m/m ³

Penulis membandingkan densitas torsi dari desain *cycloid magnetic gear* pada penelitian ini dengan densitas torsi *cycloid mechanical gear* dari katalog *cycloid mechanical gear* oleh PT Interjaya. Perbandingan dilakukan pada volume *gearbox* yang sama. Pada Tabel 4.2 terlihat bahwa densitas torsi *cycloid magnetic gear* masih sangat rendah. Faktor yang memengaruhi perbedaan torsi dapat disebabkan karena perbedaan jumlah gigi yang digunakan. Pada desain *cycloid magnetic gear* digunakan jumlah gigi magnetik yaitu 60 dan 62. Jumlah tersebut dua kali lebih banyak dibanding dengan jumlah gigi mekanik pada *cycloid mechanical gear*. Sehingga dengan volume yang sama, ukuran gigi mekanik pada *cycloid mechanical gear* lebih besar sehingga kontak yang terjadi antara *cycloidal disc* dan *ring gear pin* lebih

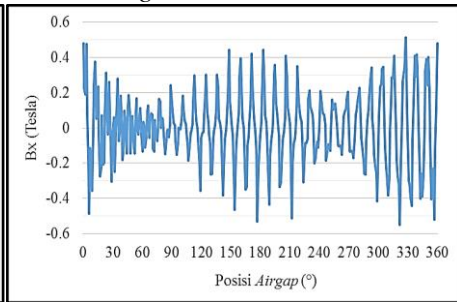
banyak. Hal ini mengakibatkan gaya yang terjadi pada *cycloidal mechanical gear* lebih besar dan torsi menjadi lebih besar pula.

Selain itu, faktor lain yang memengaruhi perbedaan torsi dapat disebabkan karena bentuk magnet permanen yang digunakan. Penulis menggunakan magnet permanen berbentuk balok lurus. Torsi yang dihasilkan bisa lebih besar apabila menggunakan magnet permanen berbentuk balok melengkung karena distribusi induksi magnetik lebih menyebar sehingga torsi bisa naik. Namun penulis menggunakan magnet permanen berbentuk balok lurus karena pada kenyataannya yang banyak tersedia di pasaran yaitu magnet permanen berbentuk balok lurus dan susah untuk mendapatkan magnet permanen berbentuk balok melengkung sesuai dengan desain yang diinginkan.

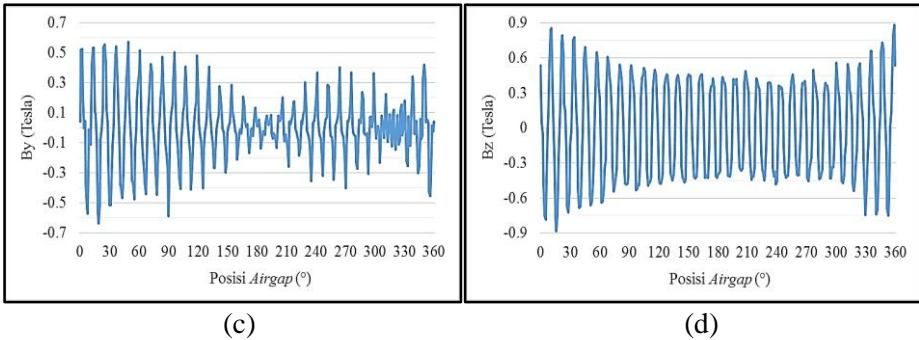
Dalam penelitian ini, dimensi magnet permanen dari segi ketebalan, panjang, dan lebar tidak divariasikan. Sehingga optimasi desain *cycloid magnetic gear* masih dapat dilakukan apabila hendak meningkatkan densitas torsi agar mampu bersaing dengan densitas torsi *cycloid mechanical gear*.



(a)



(b)



Gambar 4.6 Grafik Induksi Magnetik (B) di Daerah *Airgap* dengan *Airgap* 0,2 mm dan Jarak Eksentrik Poros Input 3 mm

(a) B_{total} , (b) B_x , (c) B_y , (d) B_z

Gambar 4.5 merupakan grafik induksi magnetik di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* untuk desain dengan *airgap* 0,2 mm dan jarak eksentrik poros input 3 mm. Dapat dilihat pada Gambar 4.5 (a), *trendline* B_{total} menurun seiring bertambahnya posisi *airgap* hingga sekitar posisi 90° karena B_x dan B_z turun. *Trendline* B_{total} masih menurun hingga sekitar posisi 210° karena B_y turun walaupun B_x sempat naik. *Trendline* B_{total} terlihat konstan hingga sekitar posisi 270° karena B_x turun dan B_y naik. Kemudian *trendline* B_{total} naik hingga posisi 360° karena B_x dan B_z naik walaupun B_y sempat turun. Dari hal tersebut, menandakan bahwa B_x , B_y , dan B_z di setiap posisi sangat bervariasi yang sangat memengaruhi B_{total} .

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Bertambahnya *airgap* mengakibatkan penurunan torsi *cycloid magnetic gear*. Penurunan torsi terjadi karena induksi magnetik di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* semakin berkurang dengan bertambahnya *airgap*. Peningkatan *airgap* dari 0,2 mm ke 1 mm, 1 mm ke 2 mm, dan 2 mm ke 3 mm mampu mengubah torsi dalam kisaran 20,193% - 26,709% (13,84 N.m - 27,65 N.m).
2. Bertambahnya jarak eksentrik poros input mengakibatkan penurunan torsi *cycloid magnetic gear*. Semakin besar jarak eksentrik poros input maka diameter *outer gear* menjadi semakin bertambah dan jarak antara *inner gear* dan *outer gear* menjadi semakin bertambah, sehingga induksi magnetik di daerah antara *inner gear* dan *outer gear* menjadi semakin berkurang dan torsi yang dihasilkan menjadi turun. Namun torsi untuk jarak eksentrik poros input 1 mm dan 2 mm memiliki nilai lebih rendah daripada jarak eksentrik poros input 3 mm karena pertemuan antar magnet permanen pada *inner gear* dan *outer gear* di posisi *airgap* 270° berhadapan hampir simetris yang mengakibatkan induksi magnetik didominasi pada arah sumbu X, sedangkan pada arah sumbu Y dan Z induksi magnetik yang dihasilkan sedikit, sehingga resultan induksi magnetik melemah dan torsi menjadi rendah. Peningkatan jarak eksentrik poros input dari 1 mm ke 2 mm, 2 mm ke 3 mm, 3 mm ke 4 mm, dan 4 mm ke 5 mm mampu mengubah torsi dalam kisaran 0,945% - 45,420% (0,775 N.m - 36,478 N.m).
3. *Cycloid magnetic gear* yang memiliki densitas torsi tinggi yaitu memiliki *airgap* dan jarak eksentrik poros input yang kecil pada desain. Dalam penelitian ini, densitas torsi paling tinggi yang diperoleh yaitu 125,923 kN.m/m³ dengan menggunakan *airgap*

0,2 mm dan jarak eksentrik poros input 3 mm pada desain *cycloid magnetic gear*.

5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan dan diharapkan bermanfaat sebagai pertimbangan dalam penelitian selanjutnya ialah sebagai berikut :

1. Analisis pengaruh variasi dimensi magnet perlu dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap torsi dan mendapatkan desain *cycloid magnetic gear* yang menghasilkan densitas torsi tinggi.
2. Analisis secara eksperimen perlu dilakukan untuk mendapatkan hasil yang lebih valid.

DAFTAR PUSTAKA

- Aji, B.W. 2017. Modelling dan Analisis Berdasarkan Studi Eksperimental Pengaruh Profil Gigi terhadap Regangan Dinamis pada Roda Gigi Kerucut Lurus dengan Metode Elemen Hingga. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Akbar, A.R. 2011. Analisis Energi Magnetik pada Magnet Permanen Akibat Perlakuan Meka-magnetik. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Ansoft. 2006. User's Guide - Maxwell 3D. Pittsburgh : Ansoft Corporation.
- Borislavov, B., Ivaylo B., dan Vilislav P. 2012. Design of a Planetary-Cyclo-Drive Speed Reducer Cycloid Stage, Geometry, Element Analyses. Vaxjo : Linnaeus University.
- Darali. 2018. What is a Cycloidal Speed Reducer?, <URL:<http://www.darali.com/page17.html>> (Diakses pada 15 Februari 2018).
- Dura Magnetics. 2018. Magnet Materials, <URL:<http://www.duramag.com/materials>> (Diakses pada 1 Maret 2018).
- Eckert, P.R., Goltz, E.C., dan Filho, A.F.F. 2014. "Influence of Segmentation of Ring-Shaped NdFeB Magnets with Parallel Magnetization on Cylindrical Actuators". Sensors 2014, 14:13070-13087.
- Furlani, E.P., 2000. "Analytical Analysis of Magnetically Coupled Multiple Cylinders". J. Phys. D, Appl. Phys. 33:28-33.
- Gignoux, D. dan Michel S. 2005. Magnetism : Materials and Applications. Boston : Springer.
- Hao, X., Hong-fei Z., dan Ji-de M. 2015. Electromechanical Integrated Magnetic Gear. Hebei : Yanshan University.
- Interjaya. 2014. Transcyko Cycloidal Speed Reducer Catalogue. Surabaya : PT Interjaya Surya Megah.

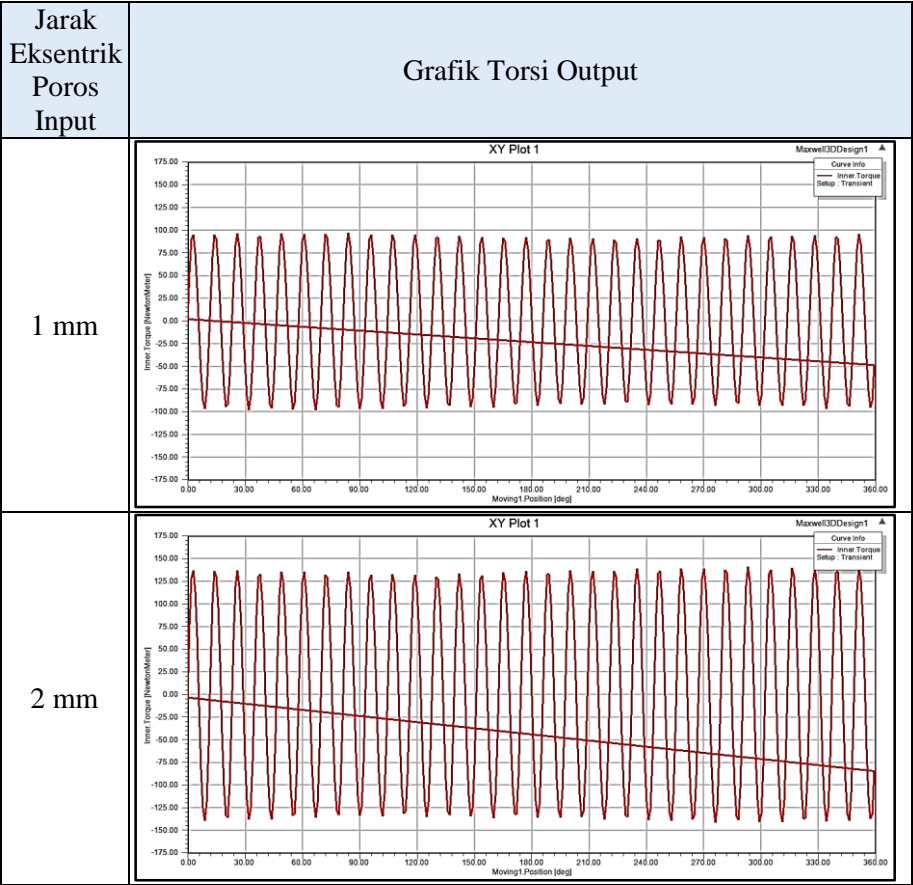
- Joergensen, F.T., Andersen, T.O., dan Rasmussen, P.O. 2008. "The Cycloid Permanent Magnetic Gear". IEEE Transactions on Industry Application 44, 6:1659-1665.
- Joergensen, F.T. 2010. Design and Construction of Permanent Magnetic Gears. Aalborg : Aalborg University.
- Kristyanto, R. 2010. Perancangan Generator DC Magnet Permanen Barium Ferit Putaran Rendah untuk Aplikasi Listrik Tenaga Angin Menggunakan Finite Element Methode Magnetiks (FEMM) Software. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Li, K., Bird, J., Kadel, J., dan Williams, W. 2015. "A Flux-Focusing Cycloidal Magnetic Gearbox". IEEE Transactions On Magnetics 51, 11:8109504.
- Matthee, A. 2017. Development of Magnetic Gear for Dry-Cooling Power Plant Applications. Stellenbosch : Stellenbosch University.
- Ognyan, A. 1988. Geometry and Forming of Epi-Cycloidal and Hypo-Cycloidal Toothed Wheels in Modified Cyclo-Transmission. Ruse : University of Ruse.
- Parker, R.J. 1990. Advances in Permanent Magnetism. New York : John Willey and Sons.
- Prayoga, S. 2014. Studi Numerik Pemanfaatan Magnet Permanen untuk Penggerak Motor. Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Spaldin, N.A. 2003. Magnetic Materials : Fundamentals and Device Applications. New York : Cambridge University Press.
- Sutjiatmo, B. 1982. Kinematika Transmisi Cyclo. Bandung : Institut Teknologi Bandung.
- Tera Analysis. 2010. QuickField : Finite Element Analysis System User's Guide. Svendborg : Tera Analysis Ltd.
- Vlack, L.H.V. 2001. Ilmu dan Teknologi Bahan. Diterjemahkan oleh Sriati Djaprie. Jakarta : Erlangga.

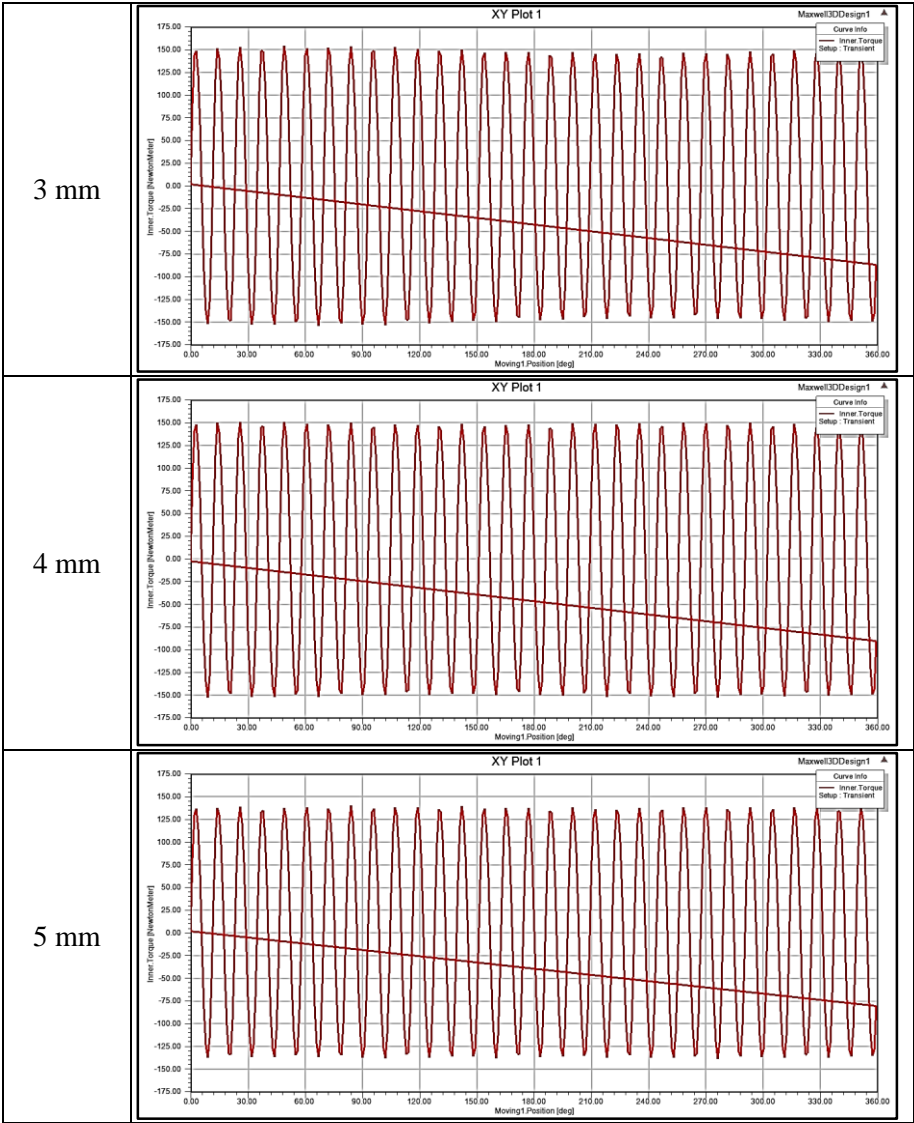
- Xu, L. dan Yang, Y. 2016. "Dynamic Modelling and Contact Analysis of a Cycloid-Pin Gear Mechanism With a Turning Arm Cylindrical Roller Bearing". *Mechanism and Machine Theory*, 104:327-349.
- Zulkifly, A. 2008. Pengaruh Variasi Komposisi dalam Pembuatan Magnet Permanen dengan Bahan Dasar Pasir Besi Lumajang. Surabaya : Surabaya : Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

“Halaman ini sengaja dikosongkan.”

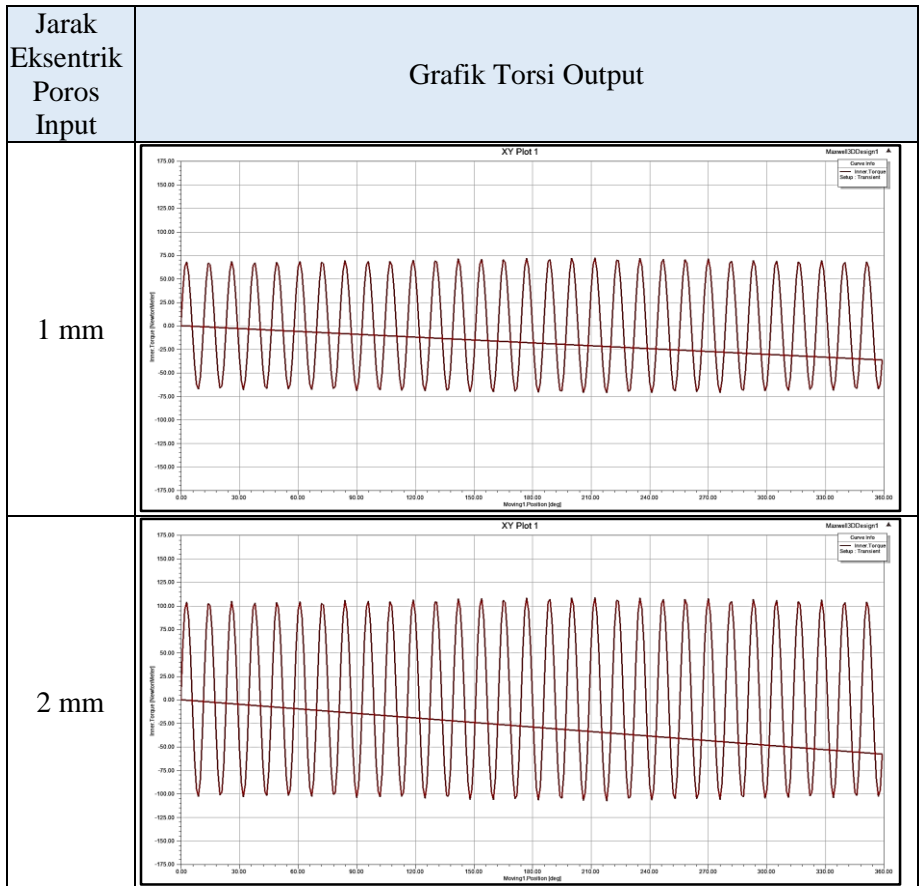
LAMPIRAN

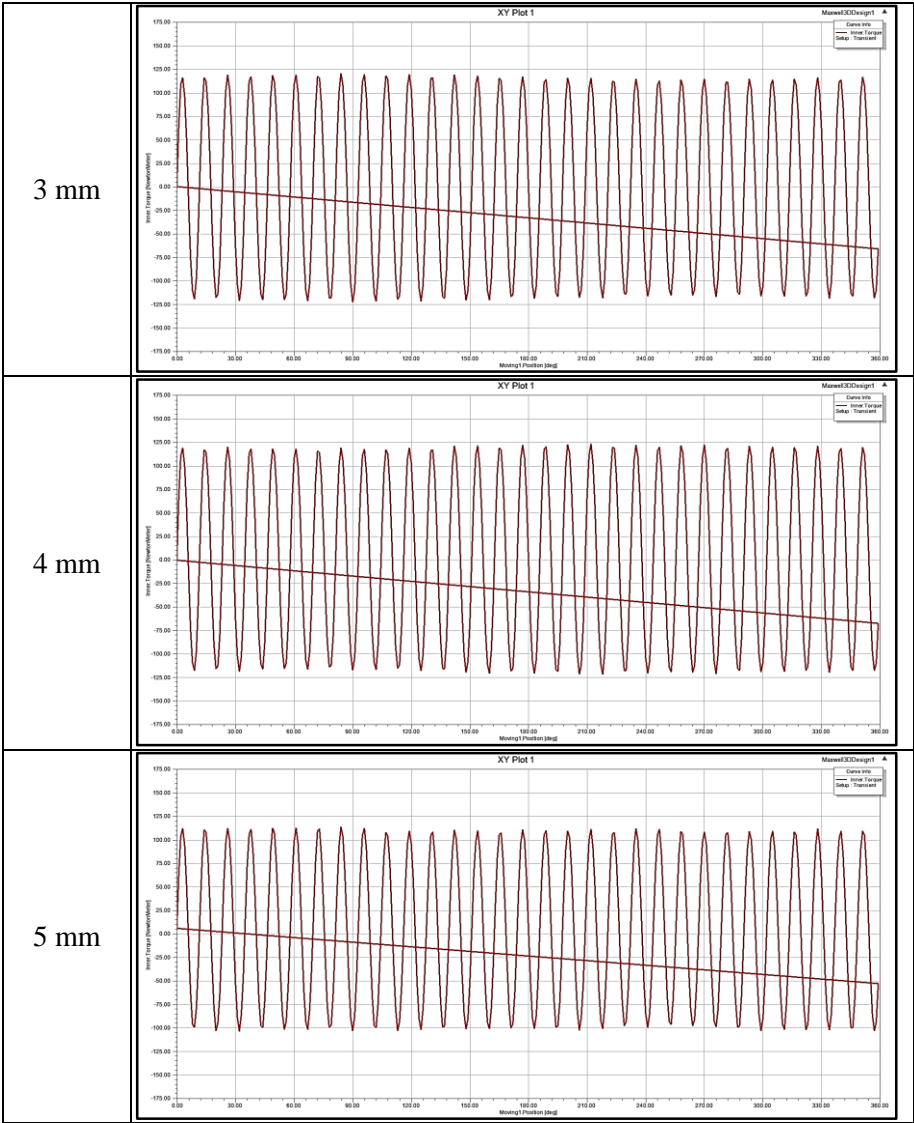
LAMPIRAN A : Data Hasil Simulasi *Transient*



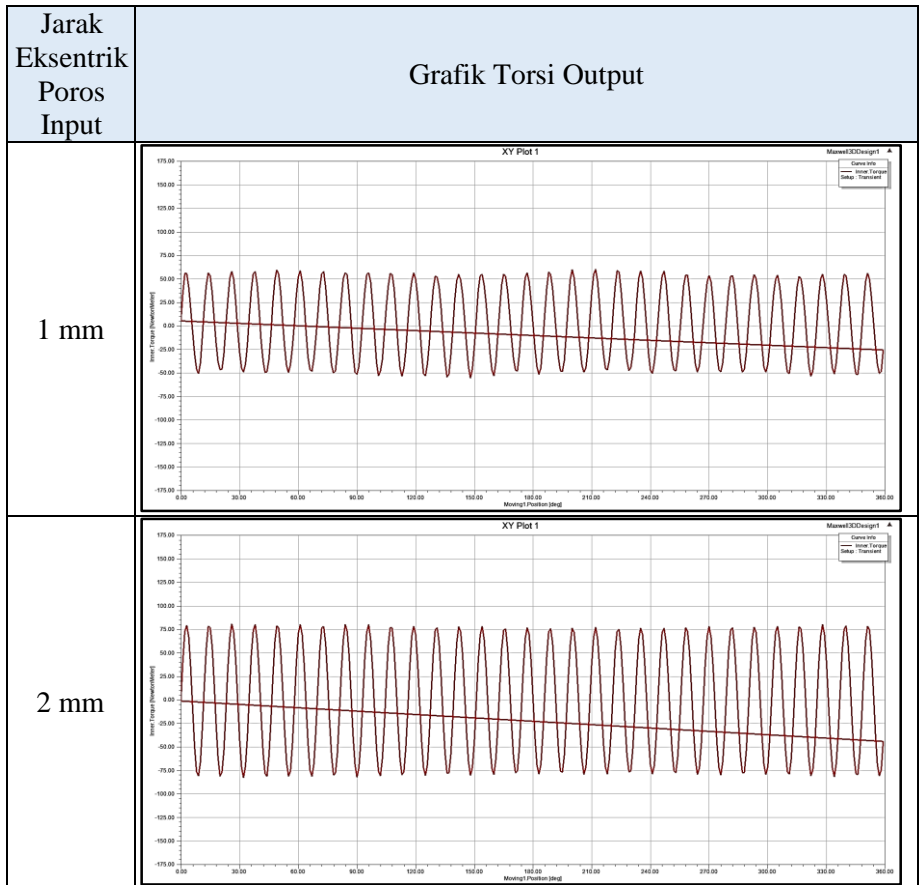


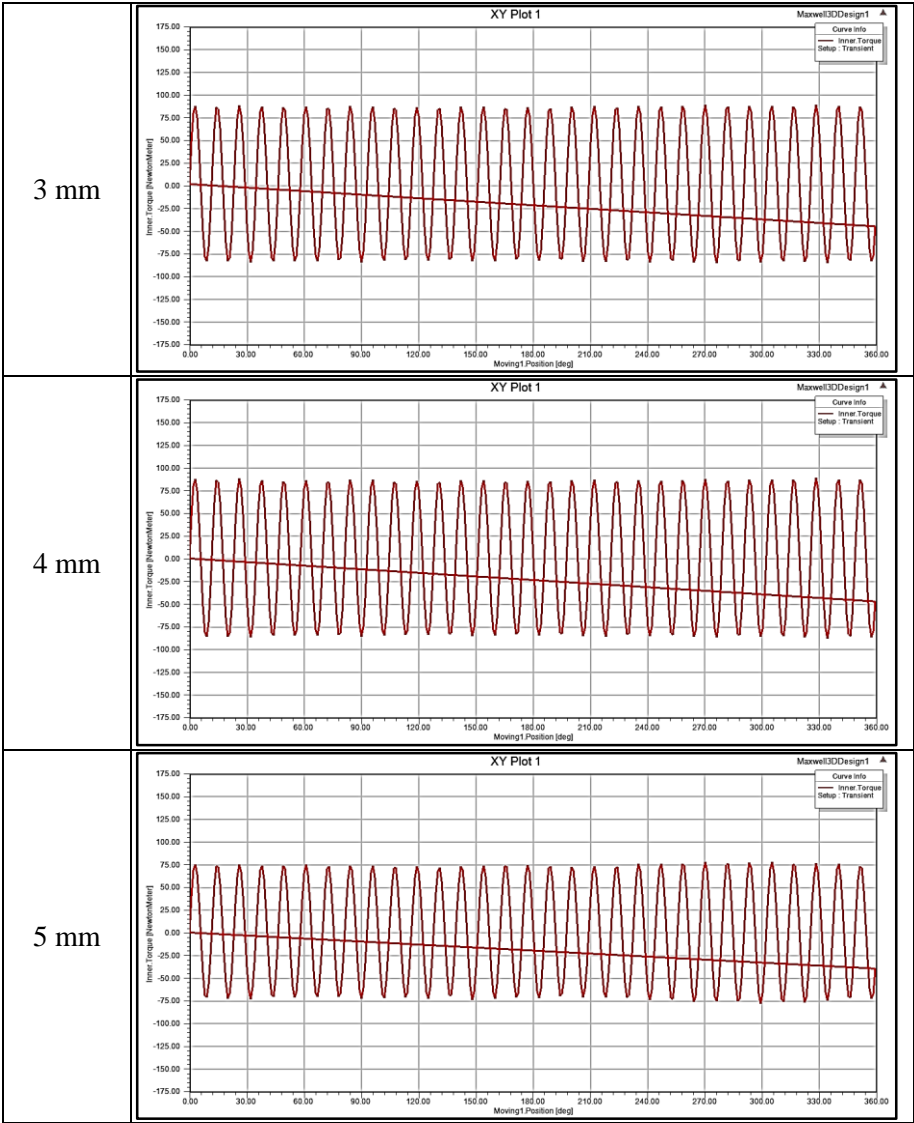
Gambar A.1 Grafik Torsi Output hasil Simulasi *Transient* dengan Airgap 0,2 mm



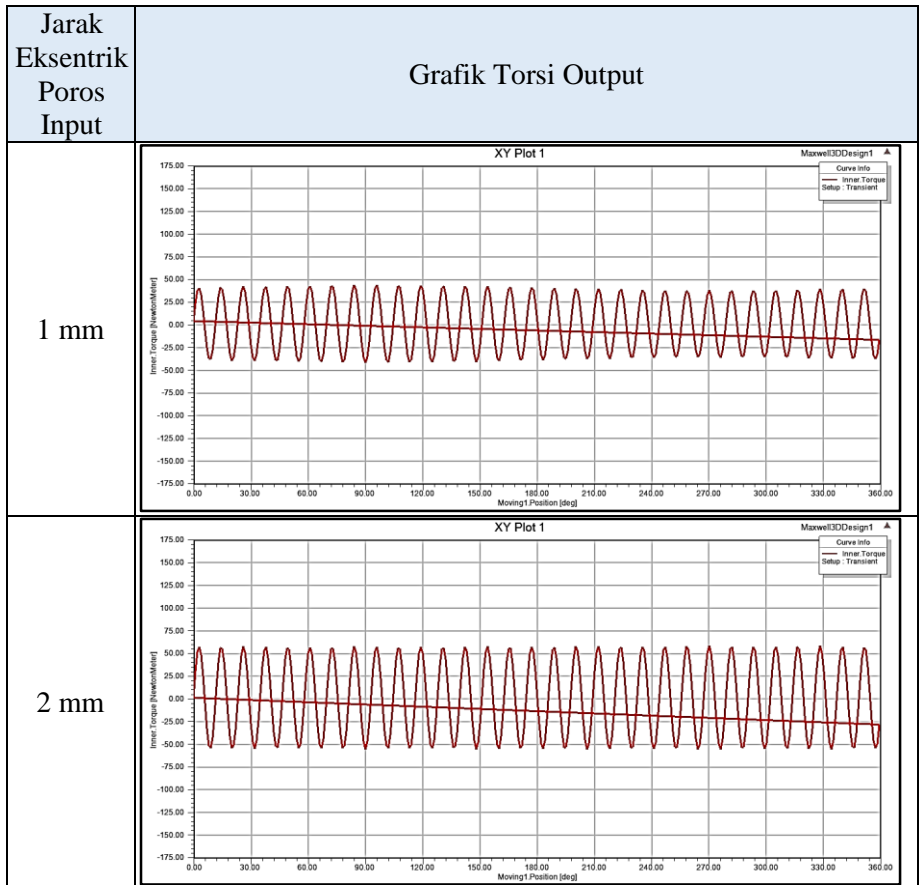


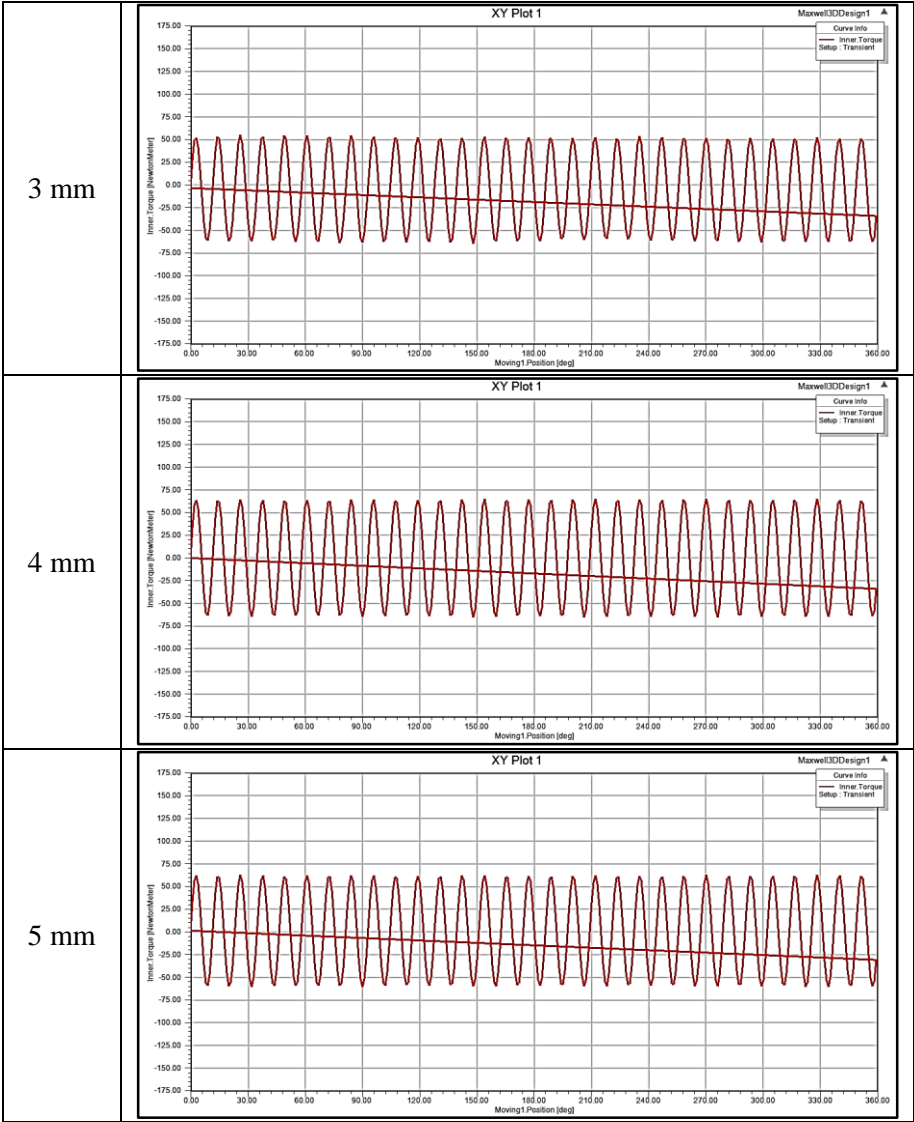
Gambar A.2 Grafik Torsi Output hasil Simulasi *Transient* dengan Airgap 1 mm





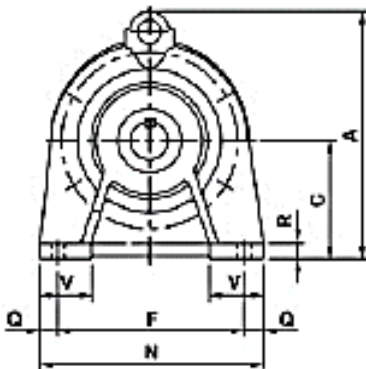
Gambar A.3 Grafik Torsi Output hasil Simulasi *Transient* dengan *Airgap* 2 mm



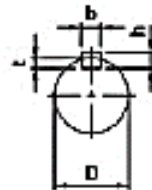


Gambar A.4 Grafik Torsi Output hasil Simulasi *Transient* dengan *Airgap* 3 mm

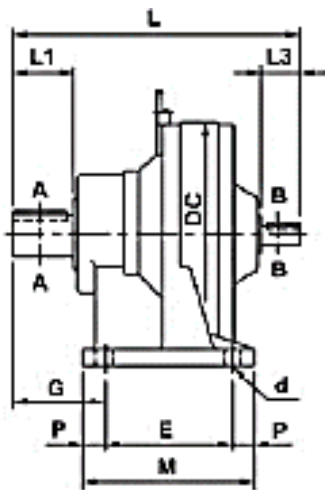
LAMPIRAN B : Spesifikasi *Cycloid Mechanical Gear*



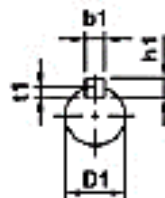
(a)



(b)



(c)

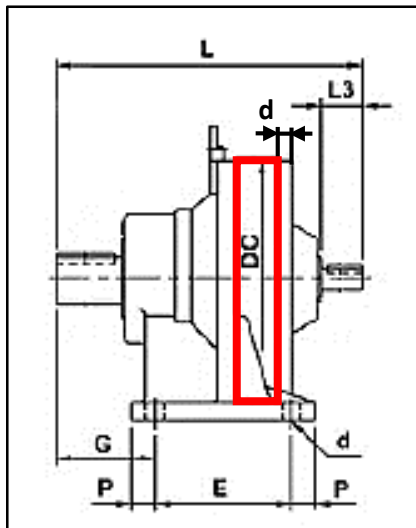


(d)

Gambar B.1 Gambar Teknik *Cycloid Mechanical Gear* Model TH 611 (a) Tampak Depan, (b) Poros Output, (c) Tampak Samping, (d) Poros Input
(Interjaya, 2014)

Tabel B.1 Spesifikasi *Cycloid Mechanical Gear* Model TH 611
(Interjaya, 2014)

Parameter	Besaran	Satuan
A	257	mm
C	120	mm
DC	204	mm
E	115	mm
F	190	mm
G	82	mm
L	259	mm
M	159	mm
N	234	mm
P	22	mm
Q	22	mm
R	15	mm
V	55	mm
d	14	mm
D	38	mm
L1	55	mm
b	10	mm
h	8	mm
t	5	mm
D1	18	mm
L3	35	mm
b1	6	mm
h1	6	mm
t1	3,5	mm
Massa	24	Kg



Gambar B.2 Gambar Teknik *Outer Gear* pada *Cycloid Mechanical Gear*
(Interjaya, 2014)

Tabel B.2 Perhitungan Volume *Outer Gear* pada *Cycloid Mechanical Gear*

Parameter	Perhitungan	Besaran	Satuan
Diameter (D)	$D = DC$	204	mm
Tebal (T)	$T = L - (L_3 - G - 0,5E - P - 2d)$	34,5	mm
Volume (V)	$V = \frac{1}{2} \times D^2 \times T$	0,001127	m ³

BIODATA PENULIS



Faiz Johan Razaq, lahir di Kabupaten Kediri pada tanggal 19 November 1995. Penulis adalah anak bungsu dari pasangan H. Moh. Hamzah, S.Ag, M.PdI dan Hj. Siti Mukhayyaroh. Penulis memulai pendidikan formalnya dari MI Miftahul Astar (2002-2008), MTsN Kediri 2 (2008-2011), SMAN Kediri 2 (2011-2014), dan akhirnya diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

pada tahun 2014 melalui jalur SBMPTN. Penulis pernah menjadi anggota Unit Kegiatan Mahasiswa Fotografi (UKAFO) ITS 2014-2015. Selama kuliah penulis aktif di beberapa organisasi kemahasiswaan antara lain sebagai staf Syi'ar Lembaga Dakwah Jurusan (LDJ) Ahs-Shaff 2015-2016, staf PSDM Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas Teknologi Industri (BEM-FTI) 2015-2016, dan kabiro *event* Media Komunikasi Teknik Mesin ITS (DIMENSI) 2016-2017. Penulis tertarik pada bidang desain dan menjadi anggota Laboratorium Mekanika Benda Padat karena ketertarikan penulis terhadap mekanika dan fenomena yang terjadi pada benda padat. Alhamdulillah pada tahun 2018 penulis berhasil menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Variasi *Airgap* dan Jarak Eksentrik Poros Input terhadap Torsi *Cycloid Magnetic Gear*”. Bagi yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut dengan penulis bisa menghubungi melalui *e-mail* faiz.johan.razaq@gmail.com.